



Nuno Miguel da Silva Gonçalves

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**CONTRIBUTO PARA O ENSINO DE PROJECTO PARA
FABRICO EM ENGENHARIA MECÂNICA COM BASE NA
ESTIMATIVA DE CUSTOS**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Mecânica**

Orientador: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2013



Nuno Miguel da Silva Gonçalves

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**CONTRIBUTO PARA O ENSINO DE PROJECTO PARA
FABRICO EM ENGENHARIA MECÂNICA COM BASE NA
ESTIMATIVA DE CUSTOS**

**Dissertação para obtenção
do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica**

Orientador: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado, FCT/UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro 2013

CONTRIBUTO PARA O ENSINO DE PROJECTO PARA FABRICO EM ENGENHARIA
MECÂNICA COM BASE NA ESTIMATIVA DE CUSTOS

Copyright © 2013 Nuno Miguel da Silva Gonçalves

Faculdade Ciências e Tecnologia

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação ao meu avô, António Pinto da Silva. Dedico-a ainda a todos aqueles que se mostraram incansáveis ao meu lado na luta pelo alcance de um grau de habilitações que me permitirá além da realização pessoal, poder dar um dia aos meus filhos tanto ou mais do que recebi dos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor António José Freire Mourão pela oportunidade concedida de alargar os meus conhecimentos pelo desenvolver deste trabalho, pela disponibilidade, compreensão, apoio, críticas, sugestões e bom aconselhamento ao longo não só da elaboração deste trabalho como da minha vida académica enquanto meu Professor. Foi uma experiência enriquecedora que guardarei com gosto.

Um especial obrigado aos meus pais, Vicente Gonçalves e Eugénia Gonçalves, à minha irmã Filipa Gonçalves, à minha avó Helena, à minha namorada, amigos e colegas de faculdade, dos quais sempre tive todo o apoio, paciência e motivação no período de realização da dissertação e ao longo da minha vida académica.

RESUMO

Tendo em conta que o projecto de um produto determina cerca de 80% do seu custo de produção, esta dissertação procura, apresentar um contributo metodológico didático, focado para a formação em "Projecto para fabrico" em Engenharia Mecânica.

Pretende ainda o aumento da sensibilidade de um engenheiro mecânico em formação, para os problemas relacionados com os custos associados às decisões tomadas ao longo do projecto de um dado componente ou peça, de modo a que estas decisões possam ser avaliadas o mais precocemente possível.

Para o efeito, recorreu-se a um *software* de estimação de custos, gratuito, com o objectivo de quantificar o custo das soluções de projecto propostas.

Foram feitas comparações objectivas de diferentes propostas de solução, utilizando apenas tecnologias de fundição como exemplo do que poderá ser aplicado a outras tecnologias.

Com o trabalho desenvolvido na elaboração desta dissertação, procurou-se o desenvolvimento de um método lógico de abordagem a estas questões.

Verificou-se que a metodologia e o *software* utilizados se mostram adequados ao objectivo proposto.

PALAVRAS-CHAVE

Estimativa de custos de fabrico

Ensino de engenharia mecânica

Projecto para fabrico

ABSTRACT

Given that the design of a product determines about 80% of its production cost, this master's degree dissertation seeks to present a didactic methodology that contributes to the education of "Design for Manufacturing" in Mechanical Engineering.

It also aims to raise the awareness of a mechanical engineer in training, to problems related to costs associated with the decisions taken during the design of a given component or part, so that these decisions can be assessed as early as possible.

For this purpose, a free cost estimation software was used in order to quantify the costs involved in the project solutions proposed.

Objective comparisons of different proposed solutions and possible technologies for manufacturing were made. With the work developed in the preparation of this dissertation, we aimed to develop a logical method of approach to these issues.

It has been found that the method and the software used are suited to the purpose proposed.

KEYWORDS

Manufacturing cost estimate

Mechanical Engineering education

Design For Manufacturing

ÍNDICE DE MATÉRIAS

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	vi
PALAVRAS-CHAVE	vi
ABSTRACT.....	viii
KEYWORDS.....	viii
ÍNDICE DE MATÉRIAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABELAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 ENQUADRAMENTO	3
2.1 Evolução do desenvolvimento de um projecto e custos associados	3
2.2 O PPFM e a Engenharia Simultânea.....	6
2.3 O PPFM na formação em engenharia mecânica	6
3 METODOLOGIA.....	9
3.1 Introdução	9
3.2 Metodologia proposta	10
3.2.1 Fase A - Selecção de tecnologias alternativas	13
3.2.2 Fase B - Avaliação do peso dos parâmetros no custo unitário	13
3.2.3 Fase C - Comparação entre tecnologias	14
3.2.4 Fase D - Avaliação do custo unitário em função da complexidade geométrica da peça.....	15
4 SOFTWARE PARA A ESTIMAÇÃO DO CUSTO DE FABRICO DE PEÇAS	17
4.1 Introdução	17
4.2 Fundição por injeção - Estimativa baseada nas características da peça.....	19
4.3 Fundição em areia - Estimativa baseada nas características da peça	19
5 ANÁLISE DE CASOS	23
5.1 Introdução	23
5.2 Fase A - Selecção de tecnologias	23
5.2.1 Peça de referência - definição da sua geometria e material.....	23
5.2.2 Selecção de tecnologias	24
5.3 Fase B - Avaliação do peso dos parâmetros no custo unitário	25

5.3.1	Parâmetros envolvidos na tecnologia analisada.....	25
5.3.2	Influência da quantidade, da tolerância e do acabamento superficial no custo da peça.....	26
5.3.3	Análise de influências e adequação de gamas.....	29
5.4	Fase C - Comparação entre fundição injectada e fundição em areia	36
5.4.1	Comparativo do custo unitário	40
5.4.2	Comparativo do custo de ferramentas	42
5.4.3	Comparativo do custo de produção	42
5.4.4	Conclusão	43
5.5	Fase D - Avaliação do custo unitário em função da complexidade da peça.....	43
5.5.1	Caso de estudo 1 - Caixa simples	44
5.5.2	Caso de estudo 2 - Caixa simples com furo na base	44
5.5.3	Caso de estudo 3 - Caixa com aba lateral	45
5.5.4	Caso de estudo 4 - Caixa com 2 furos laterais	45
5.5.5	Caso de estudo 5 - Caixa com 4 furos laterais	46
5.5.6	Caso de estudo 6 - Caixa com rasgos verticais.....	46
5.5.7	Caso de estudo 7 - Caixa com rasgo longitudinal	47
5.5.8	Caso de estudo 8 - Caixa com rasgo longitudinal e 12 furos	47
5.5.9	Caso de estudo 9 - Caixa com topo não-plano.....	48
5.5.10	Caso de estudo 10 - Caixa com topo e fundo não-planos.....	48
5.5.11	Casos de estudo - Síntese de resultados	49
5.6	Influência do material no custo	51
5.7	Discussão	52
5.7.1	Considerações relativas a decisões de carácter conceptual	52
5.7.2	Considerações relativas a decisões no projecto de pormenor	53
6	CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO.....	59
7	REFERÊNCIAS	63

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 - Informação versus custo de alterações durante o desenvolvimento do produto (A. Mourão, 1999)</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.2 – Relação entre custos efectivos e custos comprometidos ao longo do ciclo de vida de um produto (adaptado de J.A. Barton et al, 2001)</i>	<i>4</i>
<i>Figura 2.3 - A necessidade de utilizar informação tecnológica e de custo durante o projecto, (A. Mourão, 1999))</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3.1 - Síntese da proposta para a abordagem a desenvolver.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia proposta</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3.3 - Fase A da metodologia proposta.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.4 - Fase B da metodologia proposta.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.5 - Fase C da metodologia proposta.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 3.6 - Fase D da metodologia proposta.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4.1- Fundição - Estimadores disponíveis.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5.1 - Perspectiva da peça que servirá como referência</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5.2 - Características do material escolhido. Alumínio A360</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5.3 - Tecnologias com capacidade para produzir a peça especificada</i>	<i>24</i>
<i>Figura 5.4 - Parâmetros especificados para a peça em alumínio injectado</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5.5 - Custo unitário VS quantidade produzida VS tolerância e acabamento superficial da peça de referência considerada para 10 000, 100 000 e 500 000 unidades.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 5.6 - Custo unitário VS quantidade produzida VS tolerância e acabamento superficial da peça de referência para 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades</i>	<i>30</i>
<i>Figura 5.7 - Custo unitário VS tolerância variável e acabamento superficial da peça fixo para 10 000, 25 000, 50 000 e 75 000 unidades produzidas</i>	<i>32</i>
<i>Figura 5.8 - Custo unitário VS quantidade produzida VS complexidade da peça para 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades a produzir</i>	<i>35</i>
<i>Figura 5.9 - Alumínios escolhidos para as tecnologias de fundição injectada e fundição em areia (www.custompart.net)</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.10 - Peça a estudar nas tecnologias de fundição injectada VS fundição em areia.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.11 - Custo por peça - Comparativo entre fundição injectada e fundição em areia [USD].....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 5.12 - Custo de ferramentas por peça - Comparativo entre fundição injectada e fundição em areia [USD]</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.13 - Custo de produção por peça - Comparativo entre fundição injectada e fundição em areia [USD].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.14 - Caixa simples.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.15 - Caixa com furo na base.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.17 - Caixa com dois furos laterais.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.16 - Caixa com aba lateral</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.19 - Caixa com quatro rasgos verticais.....</i>	<i>46</i>

<i>Figura 5.18 - Caixa com quatro furos laterais.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.20 - Caixa com rasgo longitudinal.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.21 - Caixa com rasgo longitudinal e 12 furos</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.22 - Caixa com topo não-plano.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.23 - Caixa com topo e fundo não-planos.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.24 - Distribuição das componentes de custo da caixa com 4 furos para dois materiais (zinco e magnésio)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.25 - Custo por peça para os diferentes casos de estudo e diferentes quantidades</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.26 - Distribuição das componentes de custo para 10 000 unidades.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.27 - Distribuição das componentes de custo para 100 000 unidades.....</i>	<i>53</i>

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 4.1 - Quadro resumo dos parâmetros envolvidos na tecnologia de fundição por injeção</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 4.2 - Quadro resumo dos parâmetros envolvidos na tecnologia de fundição em areia</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 5.1 - Parâmetros considerados fixos e variáveis para a análise.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 5.2 - Resultados obtidos para as 9 combinações de quantidade, tolerância e acabamento superficial para produções de 10 000, 100 000 e 500 000 unidades [USD]</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 5.3 - Resultados obtidos para quantidade, tolerância e acabamento superficial para produções de 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades [USD].....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 5.4 - Variação do valor da tolerância para acabamento superficial fixo em qualidade mecânica</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 5.5 - Resumo do Custo de cada peça para diferentes quantidades a produzir e diferentes qualidades de tolerância.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 5.6 - Influência da complexidade para parâmetros médios de acabamento superficial e tolerância</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 5.7 - Resumo do custo de cada peça para diferentes quantidades a produzir, diferentes qualidades de tolerância e diferente complexidade</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 5.8 - Acabamentos superficiais típicos inerentes a cada tecnologia</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 5.9 - Características da tecnologia de fundição injectada</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 5.10 - Características da tecnologia de fundição em areia.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 5.11 - Custos associados à produção da peça na tecnologia de fundição injectada [USD].....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 5.12 - Custos associados à produção da peça na tecnologia de fundição em areia [USD].....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 5.13 - Comparativo custo por peça - fundição injectada VS fundição em areia [USD]</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 5.14 - Custos de fabrico de uma caixa simples - Fundição injectada [USD].....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 5.15 - Custos de fabrico de uma caixa com furo na base - Fundição injectada [USD]</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 5.16 - Custos de fabrico de uma caixa com aba lateral - Fundição injectada [USD].</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 5.17 - Custos de fabrico de uma caixa com dois furos laterais - Fundição injectada [USD].....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 5.18 - Custos de fabrico de uma caixa com quatro furos laterais - Fundição injectada [USD].....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 5.19 - Custos de fabrico de uma caixa com quatro rasgos verticais - Fundição injectada [USD].....</i>	<i>46</i>
<i>Tabela 5.20 - Custos de fabrico de uma caixa com rasgo longitudinal - Fundição injectada [USD].....</i>	<i>47</i>

<i>Tabela 5.21 - Custos de fabrico de uma caixa com rasgo longitudinal e 12 furos - Fundição injectada [USD].....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 5.22 - Custos de fabrico de uma caixa com topo não-plano - Fundição injectada [USD].....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5.23 - Custos de fabrico de uma caixa com topo e fundo não-planos - Fundição injectada [USD].....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5.24 -Resumo dos resultados para os custos de fabrico das várias peças em análise [USD].....</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 5.25 - Tabela dos resultados obtidos para os custos de fabrico da peça para diferentes materiais</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 5.26 - Síntese das considerações relativas ao projecto de pormenor</i>	<i>56</i>

1 INTRODUÇÃO

A formação em engenharia mecânica é focada fortemente em matérias de ciências de engenharia, de projecto - em particular, no dimensionamento - e em tecnologias de fabrico. Contudo, as relações entre o projecto e as tecnologias são pouco atendidas embora cerca de 70% do custo de fabrico de um produto seja determinado na fase do seu projecto.

Esta dissertação pretende mostrar como o custo de fabrico de uma determinada peça é ou não influenciado por factores intrínsecos ao projecto, como as suas características geométricas, tolerâncias, acabamentos superficiais, e por factores como o material constituinte da peça, da quantidade a produzir e da tecnologia de fabrico através do qual a peça é produzida.

As análises efectuadas ao longo deste estudo pretendem constituir uma confirmação prática de ideias apreendidas ao longo do curso nas disciplinas de tecnologia e de projecto, onde o aluno aprende como funcionam estas tecnologias, como se processam, a que se aplicam, que parâmetros envolvem, mas não consegue ter uma "prova" concreta dos custos inerentes a determinada decisão aquando da concepção da peça e que consequências trará até chegar à produção, pelo que uma análise semelhante, pode constituir conhecimento da maior relevância nas disciplinas de projecto e na actividade profissional de um engenheiro.

Assim, este trabalho pretende, numa perspectiva didáctica, contribuir para a sensibilização de um estudante de engenharia mecânica em formação, para os problemas relacionados com as decisões a tomar aquando do projecto de um dado componente ou peça. Pretende ainda fomentar nos estudantes a capacidade para avaliar as decisões o mais precocemente possível, seguindo uma metodologia estruturada para o efeito.

Na realização deste trabalho, é utilizado um *software* que existe, gratuito, que permite quantificar o custo de uma peça e assim fazer comparações objectivas de diferentes propostas de solução e escolhas de tecnologia. Para o efeito foram analisados alguns casos de peças simples, com alternativas de fabrico por fundição. Estes casos permitiram obter um conjunto de linhas de orientação que contribuem para a estrutura do raciocínio do estudante de engenharia mecânica para o desenvolvimento de produtos. O trabalho realizado não é exaustivo em termos de exploração das capacidades do *software*, no entanto pretende mostrar como esta abordagem poderá constituir uma mais valia na formação, tanto de estudantes como de profissionais de engenharia.

Quanto à estrutura da dissertação, esta é constituída por seis capítulos.

O capítulo 1 é o presente capítulo onde é feita a introdução ao tema abordado e são apontados os seus objectivos, seguindo-se a indicação da estrutura da dissertação.

No capítulo 2, é feito o enquadramento no qual se apresenta a evolução do desenvolvimento de um projecto e custos a ele associados, são apresentados os conceitos de

Projecto Para Fabrico e Montagem (PPFM) e a sua ligação com a engenharia simultânea, seguindo-se algumas considerações acerca de PPFM .

No capítulo 3, é apresentada a metodologia proposta e nele são descritas as fases que a constituem em articulação com um *software* de estimação de custos de fabrico.

No capítulo 4, é descrito o *software* que será utilizado para a estimação de custos e as estimativas utilizadas, com destaque para a sua aplicação em fundição por injeção e em areia.

No capítulo 5 são apresentados os casos práticos analisados pondo em prática a metodologia proposta, com as suas quatro fases constituintes e são discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões. Estas são apresentadas em três categorias: a) relativas à análise dos casos; b) relativas à utilização do *software* de estimação de custos; e c) relativas à metodologia proposta, seguindo-se algumas considerações quanto a possíveis evoluções deste trabalho.

Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração da dissertação.

2 ENQUADRAMENTO

2.1 Evolução do desenvolvimento de um projecto e custos associados

A situação criada pela redução do ciclo de vida comercial do produto faz com que o tempo de lançamento de um produto no mercado seja crítico em termos de competitividade. Portanto, para além das características funcionais, da flexibilidade quanto a variantes da qualidade e do custo, é necessário ter em consideração o tempo de lançamento dos produtos. Este deve ser reduzido, o que implica "fazer bem à primeira".

As reduções mais significativas no custo do produto dependem mais de alterações no projecto do que de modificações de métodos ou sistemas de produção que envolvem, geralmente, grandes investimentos em equipamento, ou investimentos em organização (pessoal, métodos, reorganização de *lay-out*, etc.).

O desenvolvimento dos produtos tem sido realizado de forma sequencial e fechada.

É feita a análise de mercado pelo *Marketing*, os dados sobre o produto desejado são enviados para o Projecto onde é realizado o projecto do produto, o qual é enviado para a Engenharia da tecnologia e posteriormente para a Produção. Assim, as várias áreas de intervenção no desenvolvimento do produto vão obtendo informação sobre o produto de forma sequencial, ou seja, não intervêm desde o início do processo fazendo com que, quando este chega à Produção, hajam propostas de alterações ao projecto.

Este processo, entre a ideia do produto e a sua disponibilização no mercado é necessariamente moroso e sujeito a ocorrências imprevistas.

O custo destas ocorrências imprevistas (propostas de alterações) é elevado, como evidenciado na Figura 2.1. Assim como a informação sobre o produto é incrementada ao longo do tempo (resultado do processo de desenvolvimento), a possibilidade de proceder a alterações decresce no tempo (com a aproximação de versões finais) e o custo de alterações aumenta.

Na fase inicial de desenvolvimento do produto os ganhos na optimização do projecto são maiores, uma vez que os custos efectivos são baixos face aos custos comprometidos (ver Figura 2.2). Cerca de 60% dos custos comprometidos de um produto são determinados durante a sua fase de concepção, ou seja, no início do ciclo de vida do produto, e com o projecto de pormenor ficam definidos cerca de 80%.

A falta de ligação entre as actividades intervenientes no desenvolvimento do produto e a necessidade de redução do tempo de lançamento dos produtos leva as empresas a iniciarem uma mudança de atitude dentro dos vários departamentos e na relação entre estes. Esta

mudança é desencadeada pela necessidade de gerar informação na fase em que há pouco conhecimento sobre o produto (ver Figura 2.3).

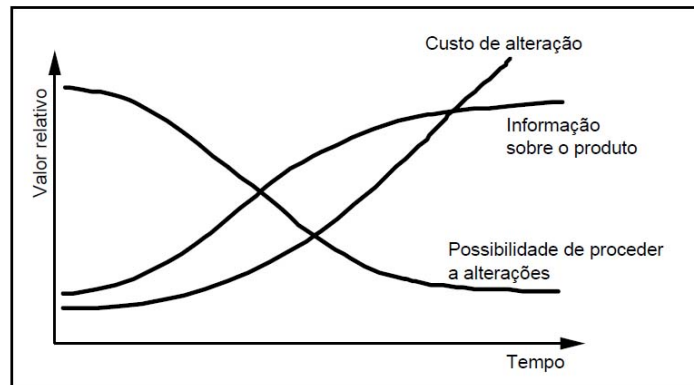


Figura 2.1 - Informação versus custo de alterações durante o desenvolvimento do produto (A. Mourão, 1999)

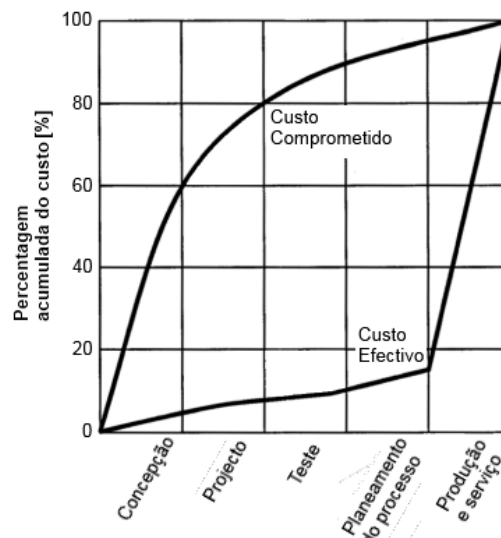


Figura 2.2 – Relação entre custos efectivos e custos comprometidos ao longo do ciclo de vida de um produto (adaptado de J.A. Barton et al, 2001)

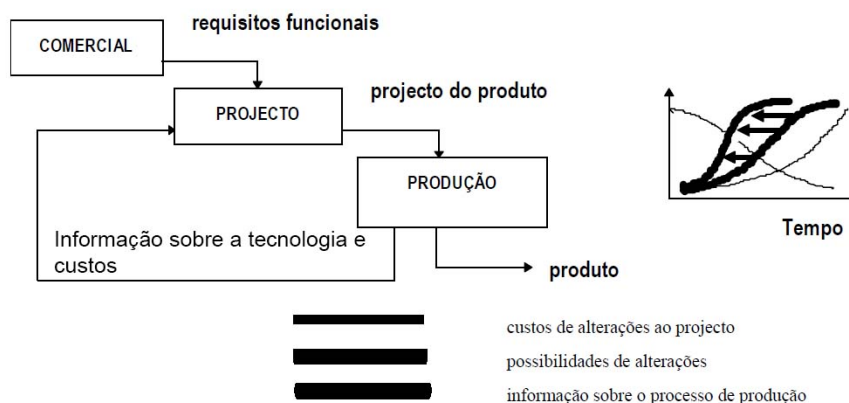


Figura 2.3 - A necessidade de utilizar informação tecnológica e de custo durante o projecto, (A. Mourão, 1999))

Para o efeito, o projecto terá de alargar o âmbito das suas actividades para além do cumprimento dos requisitos funcionais, fundamentalmente, na perspectiva das consequências no

fabrico, na montagem, na qualidade e respectivos custos. O objectivo do projecto deverá visar, também, a minimização dos custos de produção.

Embora exista um conjunto de princípios básicos de projecto para uma produção económica, por exemplo, materiais e componentes normalizados, tolerâncias largas, evitar operações secundárias, etc., (J. Bralla, 1986; H.E. Trucks, 1987), estes têm sido enunciados de uma forma casuística.

Segundo H. Vliet e K Luttermelt, (2004), o projecto para fabrico é uma metodologia que pretende incluir decisões de cariz tecnológico das soluções adoptadas na fase de projecto de produto através dos passos seguintes:

- 1) Selecção da melhor combinação de material, de geometria e de tecnologia aplicados a todas os componentes, cumprindo os requisitos funcionais do produto;
- 2) Avaliação contínua da exequibilidade dos pormenores geométricos propostos para a configuração dos componentes do produto, através de vários estágios de verificação e quantificação;
- 3) Melhoria de todos os componentes do produto, de modo a assegurar, melhorar e facilitar o seu fabrico.

Existem metodologias assentes em práticas e teorias sistematizadas e devidamente fundamentadas que se poderão designar genericamente de PPFM/Projecto Para Fabrico e Montagem (A. Mourão, 1991; R. Bogue, 2012) e que na bibliografia anglo-saxónica é designada por *Design For Manufacturing* (DFM) e por *Design For Assembly*, (DFA). Existem já alguns trabalhos consagrados em livro ao redor desta temática e que constituem referências incontornáveis. Em termos de DFA, destaca-se o trabalho desenvolvido por G.Boothroyd e P.Dewhurst (2004); em termos de DFM, destaca-se o trabalho de C. Poli (2001); e em termos genéricos numa perspectiva didáctica, o desenvolvido por K. Ulrich e S. Eppinger (2000). Para além do DFA e do DFM, apareceu um conjunto de "Design for ..." genericamente designados por DFX (T.Kuo et al., 2001), que não são mais do que a expressão de diferentes preocupações que devem ser tomadas em consideração no desenvolvimento do produto respeitantes a todo o seu ciclo de vida.

A essência do PPFM é a utilização da informação, desde a fase inicial do projecto, proveniente dos vários sectores da empresa intervenientes na concretização do produto, visando a redução do custo, o encurtar do tempo de lançamento e a melhoria da qualidade dos produtos.

Assim, o PPFM permite considerar novas iterações durante o desenvolvimento do projecto, fundamentadas na facilidade, na disponibilidade tecnológica e nos custos relativos ao fabrico, à montagem e à inspecção. Em termos de formação nestes assuntos, talvez o mais difícil seja a estimação de custos, todavia, esta constitui um critério determinante na adopção das soluções no desenvolvimento de um produto.

O DFM - *Design for Manufacturing* pode ser descrito com sendo o processo de desenho e concepção de produtos com o intuito de otimizar todas as funções de fabrico: montagem, teste, pesquisa e desenvolvimento, despacho, serviço e reparação, assegurando o melhor custo, fiabilidade, conformidade com normas, segurança, e satisfação do cliente.

O DFM, permite a redução dos custos, uma vez que os produtos são concebidos de modo a possuírem um número tão reduzido quanto o possível de peças constituintes. Assim, a meta é a da concepção de produtos mais simples de fabricar e montar, em menos tempo e com melhor qualidade. O DFM encoraja a procura por peças *standard*, o mais simples possível, que cumpram os requisitos funcionais (David M. Anderson, 2004).

2.2 O PPFM e a Engenharia Simultânea

De modo a que os métodos acima referidos possam ser aplicados de forma eficiente, todos os envolvidos no desenvolvimento de um produto devem ser integrados no respectivo processo, o que leva à denominada Engenharia Simultânea (D. Anderson, 2004). Devem, em particular, ter conhecimento das tecnologias a usar, como serão produzidos, e ter em conta que o que irão projectar deve ser pensado para que possam ser realizados nesses mesmos processos tecnológicos disponíveis na empresa. Se se tratarem de tecnologias novas, estas devem ser simultaneamente desenvolvidas a par com o novo produto, (E. C. Morley, 1998).

Tradicionalmente, o mote era *"Eu desenhei, tu fabricas!"*.

Os engenheiros envolvidos na concepção e no projecto de novos produtos, trabalhavam individualmente ou a par com outros engenheiros em gabinetes de projecto. Era um departamento "isolado", um mundo à parte. Os desenhos técnicos eram posteriormente afixados numa parede e os intervenientes no fabrico eram deixados no dilema de se oporem, recebendo por vezes um *"ah, mas agora é tarde para alterar o projecto"*, ou adaptarem-se ao lançamento de um produto que não tinha sido projectado para a industrialização. Esta situação resultava grande parte das vezes em atrasos tanto no projecto como no fabrico do produto e consequentemente na sua introdução no mercado.

Actualmente, o desenvolvimento de produtos é feito em equipas multi-funcionais com participação activa desde o início do projecto tanto dos departamentos de produção, *marketing* (e até de clientes), departamento financeiro, *designers* industriais, departamentos de qualidade, serviço, compras, vendas, especialistas em normas, advogados e operários (A. Mourão e V. Machado, 1996).

Esta equipa trabalha em simbiose não apenas no desenho para a funcionalidade, mas com a perspectiva de redução de custos, quantidades, prazos de entrega, qualidade, fiabilidade, facilidade de montagem, facilidade de reparação, minimização dos recursos humanos envolvidos, aumento da segurança e, cada vez mais, na preocupação com a pegada ambiental.

2.3 O PPFM na formação em engenharia mecânica

Como já referido na Introdução da presente dissertação, as relações entre o projecto e as tecnologias são negligenciadas na formação em engenharia mecânica.

Alguns relatos de experiências realizadas no sentido do ensino do PPFM, centram-se na exposição de regras empíricas adequadas a diferentes tecnologias e, mais recentemente, na utilização de *softwares* de simulação de processos tecnológicos com vista à maior ou menor facilidade de realização de determinados pormenores geométricos (L. Reifschneider, 2000).

De acordo com a definição metodológica dada por H. Vliet e K Luttervelt (2004), o projecto para fabrico pressupõe a avaliação e quantificação da exequibilidade da peça. Em nossa opinião esta quantificação deverá ser feita através do custo estimado associado ao fabrico. De facto, ao longo dos anos diversos trabalhos de cariz científico têm sido desenvolvidos com vista à estimação de custos, muitos dos quais com um grau de pormenor muito elevado, como é bem patente nos trabalhos desenvolvidos por F.i H'mida et al. (2006) e por A. Niazi e J. S.Dai (2006) no qual este último apresenta um estado-da-arte exaustivo.

Alguns trabalhos científicos com génese nos anos 80 do século XX, têm conduzido a ferramentas informáticas comerciais. Estas começaram recentemente a ser utilizadas em grandes corporações industriais, nomeadamente na indústria automóvel e seus fornecedores de primeira linha, no desenvolvimento dos seus produtos. Um exemplo desta evolução é o caso de G.Boothroyd com a *Boothroyd Dewhurst, Inc* (www.dfma.com). Encontram-se outras ferramentas comerciais destinadas à indústria e que cumprem efectivamente a capacidade de avaliação de custos (www.mtisystems.com). Porém, acarretam custos muito elevados e utilização de dados de fabrico, o que torna o seu acesso difícil para utilização didáctica.

A constatação da existência de um *software* de acesso livre mas com características de utilização profissional gerou a ideia de avaliação do mesmo com vista à sua utilização para fins didácticos. Para esse efeito, foi considerado o desenvolvimento de uma hipótese de trabalho com vista ao desenvolvimento de uma metodologia que permita educar os estudantes de engenharia mecânica nesta temática.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Com a presente dissertação pretende-se desenvolver uma metodologia que promova a sensibilidade (aliada ao conhecimento técnico adquirido em disciplinas de especialidade) para a aplicação dos conceitos de DFM. Esta será desenvolvida com recurso à análise de casos concretos, utilizando meios disponibilizados na *World Wide Web*, que permitem a tomada de decisões sobre a peça com base na respectiva estimativa de custo de fabrico (ver Figura 3.1).

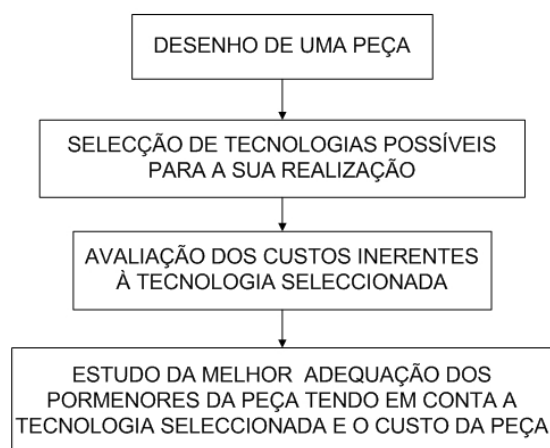


Figura 3.1 - Síntese da proposta para a abordagem a desenvolver

Nesta abordagem, pretendemos compreender como é influenciado o preço unitário de cada peça, face à quantidade de peças a produzir, à tolerância especificada e à qualidade do acabamento superficial.

"Qual será a variável que terá mais peso no valor final da peça? Qual a menos significativa?"

A partir de que quantidades a produzir é que estas variáveis deixam de constituir um entrave à decisão?"

Serão analisados vários casos, dos mais simples aos mais complexos. Vamos procurar identificar o comportamento dos custos de fabrico de modo a poder verificar se os resultados obtidos estão em conformidade com os expectáveis.

Ao longo do percurso académico de um aluno de engenharia mecânica, este toma conhecimento dos processos de fabrico mais usuais, dos métodos existentes para o projecto de peças, e tem uma imagem geral de como cada uma das variáveis intrínsecas a um projecto têm peso e relevância diferentes. Devido a esta formação, o engenheiro é formado de modo a ser observador, crítico.

Há por isso uma tendência natural em suspeitar que *"uma peça projectada com tolerâncias mais apertadas que outra será à partida muito mais cara que uma com tolerância mais folgada"*. De igual modo, *"um acabamento superficial com superior grau de qualidade encarece o preço final de uma peça face a uma com nível de acabamento grosseiro"*.

Essa suspeita leva o engenheiro e respectivo gabinete de projecto a procurar cumprir os requisitos funcionais utilizando tolerâncias tão largas quanto o possível e recorrendo sempre que possível a acabamentos superficiais o mais grosseiro possível de modo a que os custos sejam menores.

Há obviamente um departamento financeiro a quem responder que por vezes se mostra intransigente. No final tudo se resume a custos de fabrico que se traduzem em mais ou menos lucro no último passo da comercialização de qualquer produto.

Mas,

"Será que haverá uma quantidade de peças a fabricar a partir da qual deixa de fazer sentido esta preocupação, ou por outro lado, será esta uma questão que além de pertinente, tem realmente razão de ser?"

São respostas a estas perguntas que pretendemos dar e quantificar ao longo do trabalho desenvolvido nesta dissertação.

3.2 Metodologia proposta

A metodologia proposta nesta dissertação contempla quatro fases: Fase A, Fase B, Fase C e Fase D, (ver Figura 3.2), que correspondem às diferentes abordagens feitas para realizar análises que permitam compreender a influência de cada parâmetro e característica envolvidos e como cada um deles influencia ou não o custo final de determinada peça.

Optou-se realizar este estudo pelo processo de fundição uma vez que este é amplamente utilizado e corriqueiro quer em pequenas unidades fabris quer em grandes fábricas equipadas com o que de mais moderno existe no que concerne a tecnologia.

De acordo com a NADCA/ *North American Die Casting Association* (www.diecasting.org):

"A fundição é um dos segmentos da indústria mais importante a nível mundial.

É um processo de produção utilizado para fabricar peças e componentes para tudo. Grande parte dos objectos do nosso quotidiano são fabricados nesta tecnologia, desde utensílios de cozinha como talheres, a máquinas complexas como aviões, automóveis. De facto as peças fundidas representam 90% de todos os produtos manufacturados acabados."

A fundição vai de encontro ao objectivo de tornar o *design* mais simples, mais eficaz, uma vez que uma peça fundida é como se de uma montagem se tratasse. Em vez de serem necessários vários componentes para fazer uma peça, estes componentes, ao serem fundidos são peças monobloco que evitam as consequentes folgas e tolerâncias associadas e incrementadas com o aumento do número de peças de dada montagem. A tendência actual é a

procura pela redução de componentes de uma mesma peça procurando-se a simplicidade e redução ao máximo do número de constituintes que compõem uma peça. Onde assistimos cada vez mais a esta preocupação é na indústria automóvel onde componentes como *tabliers* que outrora eram resultantes da montagem de várias peças, estão a dar lugar a peças monobloco, reduzindo assim o inevitável problema dos ruídos parasitas associados ao número de interfaces na montagem.

É também dos processos disponíveis para análise no *software*, o que apresenta parâmetros envolvidos de mais simples compreensão e mais fáceis de especificar, já que os outros envolvem custos para os quais não temos dados que nos possibilitem acesso a todas as especificações da maquinaria envolvida no processo.

Após a compreensão e identificação dos parâmetros envolvidos neste processo de fabrico, é necessário tomar a decisão de quais serão fixos, quais serão variáveis e sendo variáveis que valores serão estudados para a quantidade a produzir, para a tolerância especificada e para a qualidade do acabamento superficial pretendido.

A Figura 3.2 mostra o conjunto das fases constituintes da metodologia proposta.

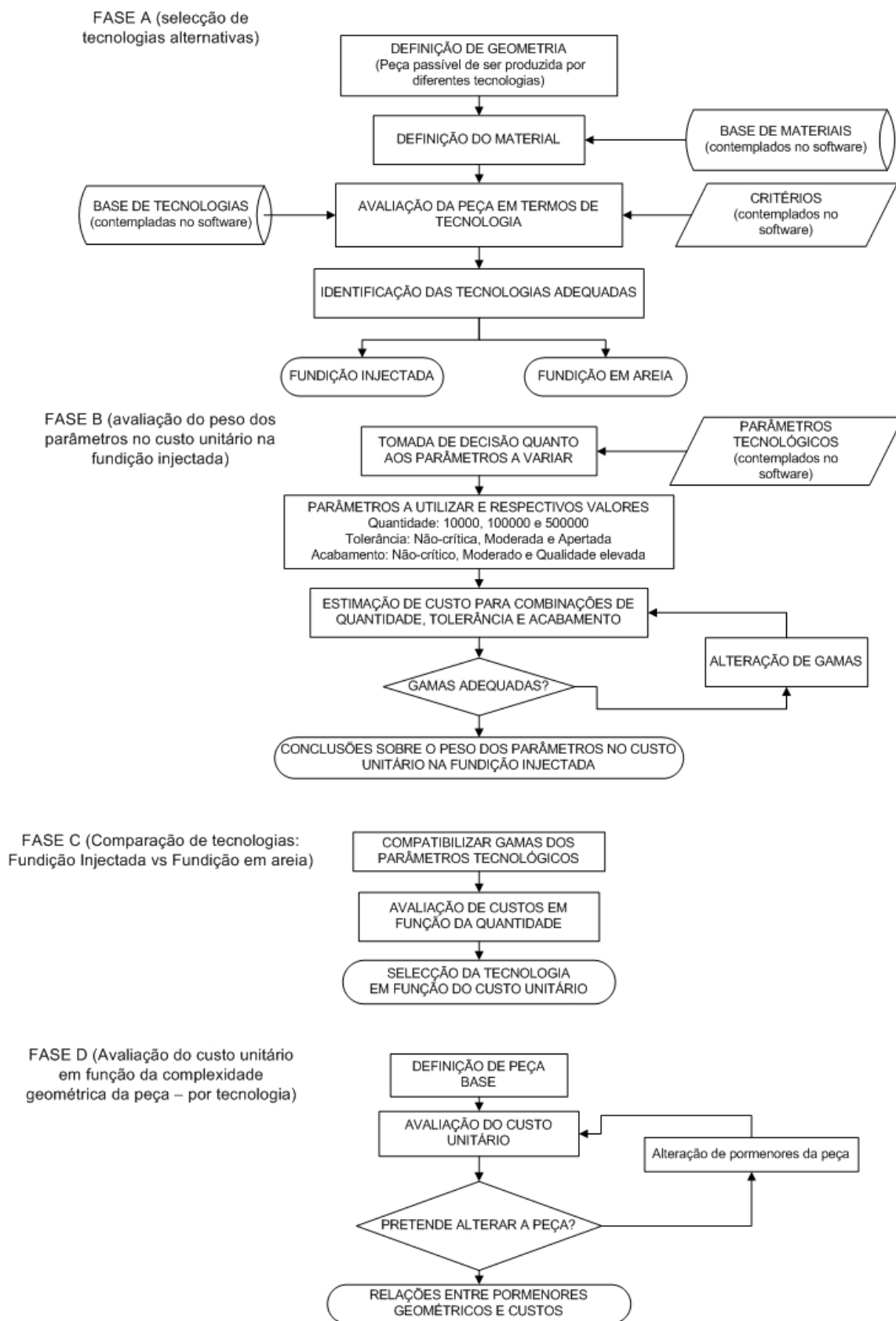


Figura 3.2 - Fluxograma da metodologia proposta

3.2.1 Fase A - Selecção de tecnologias alternativas

Na fase A, e para poder compreender as potencialidades do *software* que será utilizado, começa-se por estudar uma peça simples com o intuito de identificar os parâmetros envolvidos no seu fabrico e quais os parâmetros que têm mais ou menos peso no custo final da peça. Inicia-se pela definição de uma peça (ver Figura 3.3).

Para que esta possa ser produzida por diferentes tecnologias, é necessário que as suas características geométricas se adequem às tecnologias e às suas potencialidades, já que de antemão um engenheiro possui o conhecimento técnico que lhe permite saber que tecnologias poderão materializar ou não o seu projecto.

Em seguida procede-se à selecção do material constituinte:

A escolha para o material que constitui a mesma, é feita após a análise de uma base de dados de materiais disponíveis no *software*, sendo o material escolhido com base nos requisitos funcionais da peça e tendo em conta que permita que a peça possa ser produzida através das várias tecnologias disponíveis.

Recorre-se ao *software*, onde são inseridos os parâmetros necessários para fazer uma primeira abordagem. É necessário especificar que tolerâncias e acabamentos superficiais são pretendidos e o programa devolve um diagrama comparativo onde pode ser analisada a viabilidade e compatibilidade de tecnologias diferentes para o fabrico da peça, corroborando a ideia inicial. Para o caso inicial as tecnologias que permitem o fabrico da peça são a fundição injectada e a fundição em molde de areia, pelo que serão analisadas essas as duas tecnologias.

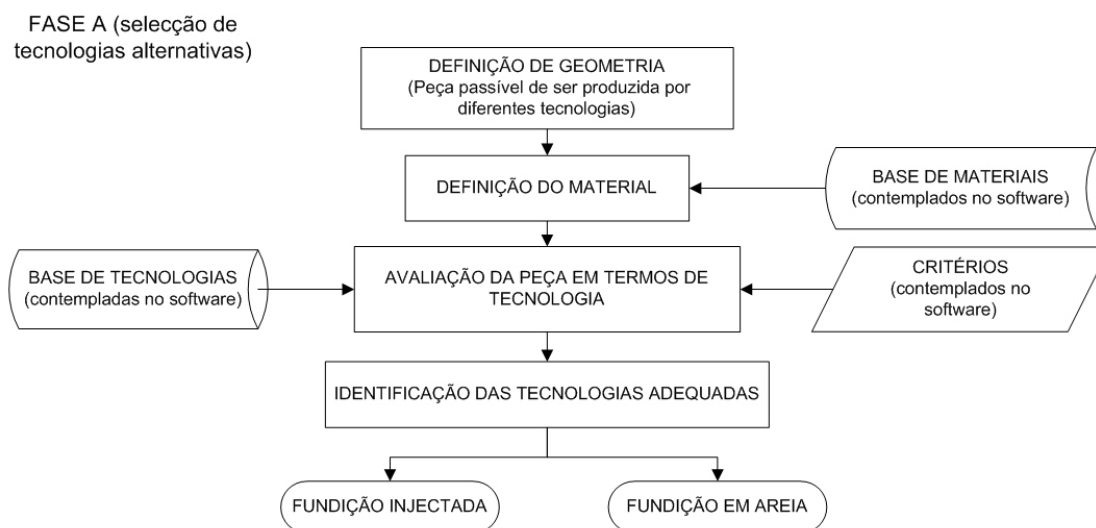


Figura 3.3 - Fase A da metodologia proposta

3.2.2 Fase B - Avaliação do peso dos parâmetros no custo unitário

Na fase B é avaliado o peso dos parâmetros no custo unitário no processo de fundição injectada (ver Figura 3.4). Devem definir-se as quantidades a produzir e analisam-se os resultados. Após esta análise, verifica-se a necessidade ou não de alterar as gamas de valores a serem considerados, devendo excluir-se quantidades que pouca relevância tenham para o

objectivo do trabalho a desenvolver: compreender o peso de cada decisão no custo final da peça.

Assim, determinam-se as quantidades críticas que devem ser analisadas.

Seguidamente procede-se à variação simultânea dos parâmetros influentes (por exemplo: quantidades a produzir, tolerâncias e acabamentos superficiais) de modo a procurar identificar uma tendência. Todos os outros parâmetros envolvidos devem ser considerados invariáveis para o caso de estudo.

Após esta variação, e tendo em conta os resultados obtidos, podem ou não fazer-se variar os valores dos parâmetros até que se obtenham conclusões referentes ao peso dos parâmetros no custo unitário.

FASE B (avaliação do peso dos parâmetros no custo unitário na fundição injectada)

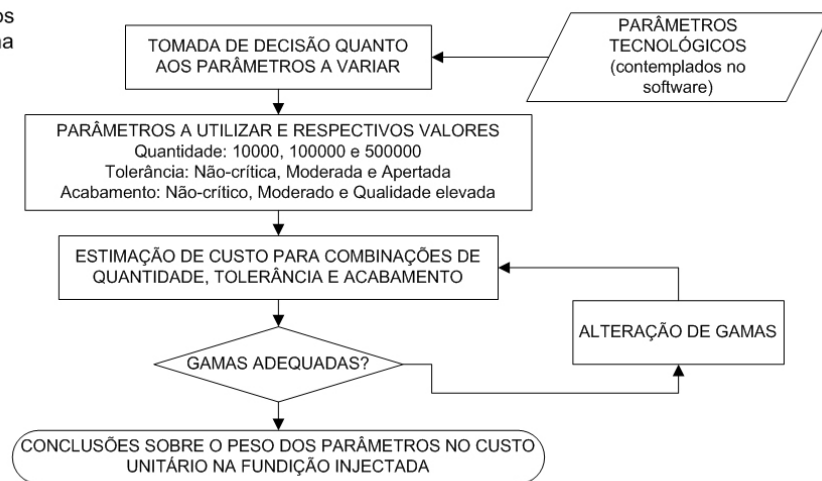


Figura 3.4 - Fase B da metodologia proposta

3.2.3 Fase C - Comparação entre tecnologias

Na fase C, realiza-se o comparativo entre tecnologias alternativas (ver Figura 3.5).

Este comparativo tem como objectivo identificar a partir de que quantidade a produzir é que uma ou outra tecnologia deve ser escolhida em detrimento da outra.

A análise de resultados permite fazer a selecção da tecnologia de fabrico em função do custo unitário da peça.

FASE C (Comparação de tecnologias:
Fundição Injectada vs Fundição em areia)

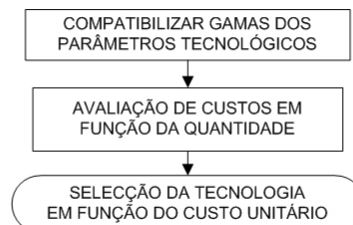


Figura 3.5 - Fase C da metodologia proposta

3.2.4 Fase D - Avaliação do custo unitário em função da complexidade geométrica da peça

Para poder compreender o peso que cada característica geométrica tem no custo final da peça, devem ser analisados diversos casos de estudo. Parte-se de uma peça-base, à qual se vão acrescentado características geométricas e consequentemente aumentado a sua complexidade. Este aumento de complexidade deve ser feito com vista à análise do comportamento do custo face a estas características da peça, fixando os outros parâmetros envolvidos.

É nesta fase que se avaliam as relações entre os pormenores geométricos da peça e os custos envolvidos na sua produção. Esta avaliação permite ao engenheiro decidir se dado pormenor pode ser modificado ou até mesmo suprimido caso se tratem de pormenores que não alterem a funcionalidade pretendida da peça projectada nem a sua estrutura (ver Figura 3.6).

FASE D (Avaliação do custo unitário em função da complexidade geométrica da peça – por tecnologia)

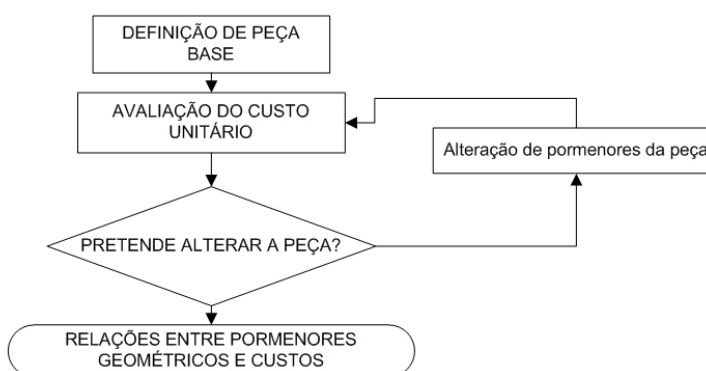


Figura 3.6 - Fase D da metodologia proposta

4 SOFTWARE PARA A ESTIMAÇÃO DO CUSTO DE FABRICO DE PEÇAS

4.1 Introdução

De modo a permitir analisar o efeito do projecto preliminar do produto, das ferramentas e do processo e avaliar o seu custo combinado, facilitando as alterações de geometria para reduzir custos, mantendo a funcionalidade e qualidade desejada, foi utilizado um *software* apresentado em www.custompart.net. Este foi explorado de modo a identificar as suas potencialidades e aferir de que modo pôde servir como ferramenta no âmbito desta dissertação: desenvolver uma possível abordagem de ensino de Projecto para Fabrico.

Como pretendemos analisar os custos associados à produção de uma peça e como este é influenciado pelos diversos procedimentos e acções envolvidos foi necessária uma familiarização com o seu funcionamento e a descoberta das suas capacidades e limitações.

No que diz respeito ao modo como os custos são calculados, o sítio no qual podemos encontrar este *software*, não apresenta nem o método de cálculo nem o peso de cada parâmetro envolvido no mesmo.

Assim, só com base em experiências e testes preliminares se conseguiu entender o que está por detrás dos valores devolvidos pelo *software*.

Os parâmetros para custos que não podemos aferir ou por outro lado, modificar (dado que não possuímos toda a informação necessária), foram considerados como "*default*", isto é, com valores de custos disponibilizados automaticamente pelo *software* (com base em valores médios fornecidos pelos fabricantes que auxiliam e melhoram constantemente a qualidade e precisão desta ferramenta de acesso livre).

A preocupação deste estudo preliminar, não foi a formulação da expressão do cálculo, mas a compreensão dos custos envolvidos nas diferentes áreas do processo de fabrico e como estes se relacionam. A expressão matemática que usa para o cálculo é relativamente complexa mas no âmbito desta dissertação não é crítico o acesso às fórmulas utilizadas, nem foi uma preocupação especial, uma vez que para todos os testes, casos de estudo e outras análises efectuadas, estas definições intrínsecas ao modo de cálculo permaneceram inalteradas, pelo que existe coerência entre todos os cálculos e suposições tomadas para que possam servir o objectivo a que nos propomos.

No entanto, podemos de forma geral caracterizar o cálculo do custo da seguinte forma:

$$C_{TOTAL} = C_{Material} + C_{Ferramentas} + C_{Produção} + C_{Acabamento}$$

Onde:

- C_{TOTAL} Representa o custo total da peça, sendo a soma de todos os custos envolvidos;
- $C_{Material}$ Diz respeito ao custo de matéria prima, contemplando o custo de refundição, taxas de reaproveitamento de sobras, percentagem de peças defeituosas, consumíveis;
- $C_{Ferramentas}$ Inclui os custos de fabrico de ferramentas e tempo necessário ao seu fabrico: custo dos moldes e sua instalação, eventual reparação e rectificação, complexidade do molde, consumíveis, ferramentas auxiliares, taxas de ocupação das máquinas;
- $C_{Produção}$ Inclui os custos associados à produção: como a execução de uma operação secundária, a preparação das máquinas, custos diretos e indiretos de trabalho, lucro associado, valor da mão-de obra, custo laboral, custos energéticos;
- $C_{Acabamento}$ Custos associados ao acabamento da peça, tais como eliminação de rebarbas, ou eventual necessidade de uma segunda operação para garantir o acabamento pretendido.

Este *software* disponibiliza estimadores de custo para tecnologias de fabrico, abrangendo assim os mais utilizados em produção, sendo elas (ver Figura 4.1):

- *Injection Molding* - Moldação por injeção;
- *Die Casting* - Fundição injectada;
- *Sand Casting* - Fundição em areia;
- *Machining* - Maquinação por torneamento ou fresagem.

Apresentam-se seguidamente as funcionalidades dos estimadores para as tecnologias abordados nos casos de estudo desta dissertação, nomeadamente, para a fundição por injeção de metais leves, e para a fundição em areia. O *software* trabalha com unidades do sistema americano, o qual é similar ao sistema imperial, razão pela qual os dados apresentados decorrentes da sua utilização não estão no sistema internacional.



Figura 4.1- Fundição - Estimadores disponíveis

4.2 Fundição por injeção - Estimativa baseada nas características da peça

Para esta estimativa, o custo do material é estimado a partir da geometria da peça e por recurso a uma lista de preços de materiais actualizada. Para o custo de produção, é seleccionada uma máquina de fundição compatível a partir de uma base de dados de 18 câmaras-quentes e câmaras frias e o tempo do ciclo é estimado a partir da geometria da peça, das propriedades do material, e das especificações da máquina.

Para o custo de ferramentas, é seleccionado um conjunto adequado usando para tal dimensões padrão e o custo de maquinaria necessário é estimado a partir da geometria da peça e outras especificações do utilizador. Estes três custos (material de produção, e ferramentas), são calculados por intermédio de 4 conjuntos de cavidade diferentes (1, 2, 4 e 8 cavidades), e é indicada a opção mais eficaz.

Os parâmetros envolvidos são apresentados na Tabela 4.1.

4.3 Fundição em areia - Estimativa baseada nas características da peça

Esta estimativa permite o cálculo dos custos do material, produção e ferramentas para fundição em areia. O custo de material inclui o custo do metal, do molde de areia, e quaisquer núcleos (*cores*) de areia. Estes custos são estimados a partir da geometria da peça e recorre a uma lista de preços de materiais actualizada. O custo de produção inclui o custo de fusão do metal, moldes e areias utilizadas, depósito do metal no molde, e separação e limpeza das peças removidas.

As taxas de produção e de trabalho para essas operações são estimadas para uma fundição de médio porte com equipamentos automatizados. Para o custo de ferramentas, tanto o custo do molde como as caixas de núcleo podem ser estimados para uma grande variedade de materiais, e melhor escolha é fornecida pelo programa.

Estes três custos (material, produção e ferramental) são calculados para quatro conjuntos consoante o número de cavidades do molde (1, 2, 3 e 4 cavidades) e a opção mais eficiente com vista ao custo é apresentada.

Os parâmetros envolvidos são apresentados na Tabela 4.2

Tabela 4.1 - Quadro resumo dos parâmetros envolvidos na tecnologia de fundição por injeção

Part Information / Características da peça	Quantity / Quantidade		Escolha do número de peças a fabricar				
	Material / Material		Escolha do material a maquinar de uma biblioteca de materiais				
	Envelope / Invólucro		Dimensões do bloco a maquinar				
	Max.wall thickness / Espessura máxima da parede		Espessura máxima da parede em polegadas da parede				
	Projected area / Área projectada		Especifica a área projectada em polegadas quadradas ou em percentagem do envelope				
	Projected holes / Furos passantes		2 opções > Sim ou Não				
	Volume/Volume		Volume em polegadas quadradas ou percentagem do envelope				
	Tolerance / Tolerância: 5 opções	Not critica / Não-crítica ($> 0.02 \mu\text{in}$)	Low precision / Baixa precisão ($\leq 0.02 \mu\text{in}$)	Moderate Precision / Precisão moderada ($\leq 0.01 \mu\text{in}$)	High precision / Elevada precisão ($\leq 0.005 \mu\text{in}$)		Very high precision / Alta precisão ($\leq 0.002 \mu\text{in}$)
	Surface roughness / Rugosidade superficial: 5 opções	Not critical/ Não-crítica ($R_a > 32$)	Smooth / Suave ($R_a \leq 32$)	Normal polish / Polimento normal ($R_a \leq 16$)	High-gloss polish / Polimento acetinado ($R_a \leq 8$)		Brilliant polish / Polimento brilhante ($R_a \leq 2$)
	Complexity / Complexidade: 6 opções	Very simple / Muito simples	Simple / Simples	Moderate / Moderado	Complex / Complexo	Very complex / Muito complexo	Custom / Customizado
Process Parameters / Parâmetros da tecnologia			Production / Produção			Tooling / Ferramentas	
Defect rate / Percentagem de defeitos (%); Regrind ratio / Rácio de reaproveitamento de sobras (%); Additives ratio/Rácio de aditivos (%); Material markup/Armazenamento e despesas com materiais (%).			Machine setup time/Tempo de preparação da máquina (horas); Machine uptime/Tempo de funcionamento da máquina (%); Post-processing time/Tempo de preparação antes da próxima fase (horas); Production markup/Custos extra além dos tempos de funcionamento e taxas de mão-de-obra (%).			Die-making rate/Taxa de fabrico do molde (\$/hora)	

Tabela 4.2 - Quadro resumo dos parâmetros envolvidos na tecnologia de fundição em areia

Part Information / Características da peça	Quantity / Quantidade		Escolha do número de peças a fabricar			
	Material / Material		Escolha do material a maquinar de uma biblioteca de materiais			
	Envelope / Invólucro		Dimensões do bloco a maquinar			
	Max.wall thickness / Espessura máxima da parede		Espessura máxima da parede em polegadas da parede			
	Projected area / Área projectada		Especifica a área projectada em polegadas quadradas ou em percentagem do envelope			
	Projected holes / Furos passantes		2 opções > Sim ou Não			
	Volume/Volume		Volume em polegadas quadradas ou percentagem do envelope			
	Defect rate/Percentagem de defeitos (%);		Especifica a quantidade de peças defeituosas produzidas			
	Tolerance / Tolerância: 5 opções	<i>Not crítica / Não-crítica (> 0.02 μin)</i>	<i>Low precision / Baixa precisão (\leq 0.02 μin)</i>	<i>Moderate Precision / Precisão moderada (\leq 0.01 μin)</i>	<i>High precision / Elevada precisão (\leq 0.005 μin)</i>	<i>Very high precision / Alta precisão (\leq 0.002 μin)</i>
	Surface roughness / Rugosidade superficial: 5 opções	<i>Not critical/ Não-crítica (Ra>32)</i>	<i>Smooth / Suave (Ra \leq 32)</i>	<i>Normal polish / Polimento normal (Ra \leq 16)</i>	<i>High-gloss polish / Polimento acetinado (Ra \leq 8)</i>	<i>Brilliant polish / Polimento brilhante (Ra \leq 2)</i>
<u>Material/Material</u>		<u>Production / Produção</u>			<u>Tooling / Ferramentas</u>	
Material/Material: Escolha do material a maquinar de uma biblioteca de materiais; Material price/Preço do material (\$/lb); Part Volume/Volume da peça (in ³); Material price/Preço do material (\$/lb); Material markup/Armazenamento e despesas com materiais (%).		Mold-Making labor/ custo de fabrico do molde (\$/hora); Cleaning Labor/ Mão de obra para limpeza dos moldes (\$/hora) ; Production markup/Custos extra além dos tempos de funcionamento e taxas de mão-de-obra (%); Labor/Mão-de-obra (\$/lb).			Tool-Making Rate/ Taxa de produção de ferramentas (\$/hora)	

5 ANÁLISE DE CASOS

5.1 Introdução

Ao longo deste capítulo irá ser posta em prática a metodologia proposta, com as suas quatro fases constituintes, utilizando para o fim, uma peça simples cuja complexidade da sua geometria base será progressivamente alterada com vista à análise destas alterações sob o ponto de vista dos custos associados ao seu fabrico.

5.2 Fase A - Selecção de tecnologias

5.2.1 Peça de referência - definição da sua geometria e material

Foi escolhida uma peça simples que servirá como referência a esta análise que tem como intuito a avaliação das alterações do custo face às alterações progressivas da sua complexidade.

A peça especificada apresenta a configuração seguidamente descrita.

Trata-se de uma caixa cúbica com 8 polegadas de aresta e 0,2 polegadas de espessura. As dimensões da mesma podem ser consultadas na Figura 5.1 (cotas em polegadas).

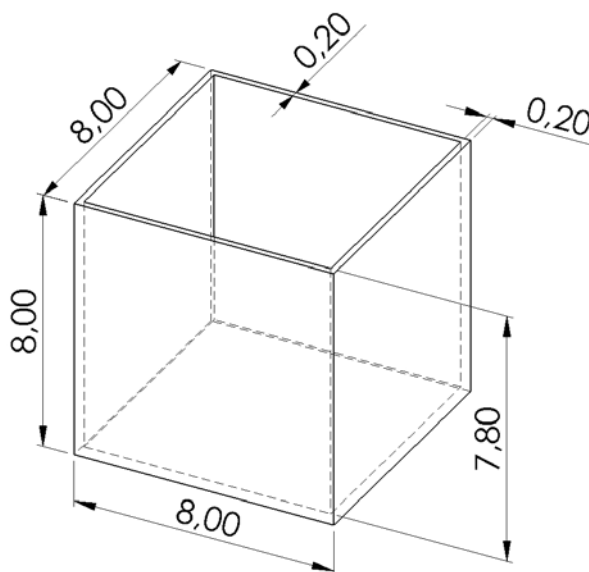


Figura 5.1 - Perspectiva da peça que servirá como referência

Para o material da peça, foi seleccionado um alumínio, do tipo A360 (ver Figura 5.2), uma vez que se trata de um metal amplamente utilizado para produção de peças nesta tecnologia cujas características podem ser consultadas na Figura 5.2.

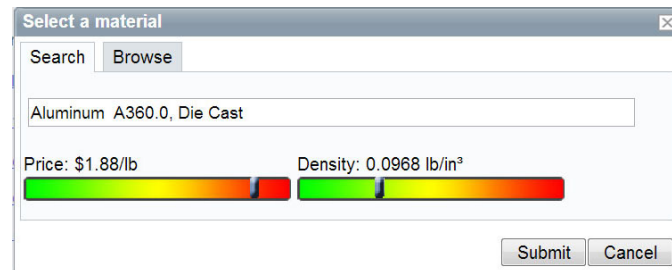


Figura 5.2 - Características do material escolhido. Alumínio A360

5.2.2 Selecção de tecnologias

Através do selector de tecnologias disponível no *software*, foram analisadas as tecnologias disponíveis e possíveis de acordo com os seguintes parâmetros: forma, quantidade a produzir, material constituinte, valor de tolerância, tempo de entrega exigido, qualidade de acabamento superficial e espessura máxima da parede (ver Figura 5.3).

Process Selector

Production ☐ Rapid Prototyping ☐

The production process selector will identify manufacturing processes that are compatible with your part's design requirements. Process selection depends upon several factors including the part's geometry and material, as well as ▼

Shape: Surface finish - Ra (µin): Quantity:

Material: Tolerance (in): Lead time:

Max wall thickness (in):

Legend: ■ Recommended ■ Feasible ■ Incompatible

Process	Compare	Shape	Quantity	Material Type	Tolerance	Lead Time	Wall Thickness	Surface Finish
Polymer Processing								
<input type="checkbox"/> Blow Molding		Recommended	Feasible	Incompatible	Feasible	Recommended	Incompatible	Incompatible
<input type="checkbox"/> Compression Molding		Recommended	Incompatible	Incompatible	Feasible	Recommended	Recommended	Incompatible
<input type="checkbox"/> Contact Molding		Recommended	Incompatible	Incompatible	Feasible	Recommended	Recommended	Incompatible
<input type="checkbox"/> Injection Molding		Recommended	Recommended	Incompatible	Recommended	Feasible	Feasible	Incompatible
<input type="checkbox"/> Injection Molding (Low Volume)		Recommended	Incompatible	Incompatible	Recommended	Recommended	Feasible	Incompatible
<input type="checkbox"/> Metal Injection Molding		Recommended	Recommended	Incompatible	Recommended	Recommended	Feasible	Incompatible
<input type="checkbox"/> Polymer Extrusion		Recommended	Recommended	Incompatible	Feasible	Recommended	Recommended	Incompatible
<input type="checkbox"/> Rotational Molding		Recommended	Incompatible	Incompatible	Recommended	Recommended	Feasible	Incompatible
<input type="checkbox"/> Thermoforming		Recommended	Incompatible	Incompatible	Feasible	Recommended	Incompatible	Incompatible
Metal Casting								
<input type="checkbox"/> Centrifugal Casting		Incompatible	Incompatible	Recommended	Recommended	Recommended	Recommended	Recommended
<input checked="" type="checkbox"/> Die Casting		Feasible	Recommended	Recommended	Recommended	Feasible	Recommended	Recommended
<input type="checkbox"/> Investment Casting		Feasible	Feasible	Recommended	Recommended	Feasible	Recommended	Feasible
<input type="checkbox"/> Permanent Mold Casting		Feasible	Feasible	Recommended	Recommended	Feasible	Recommended	Feasible
<input checked="" type="checkbox"/> Sand Casting		Feasible	Feasible	Recommended	Recommended	Recommended	Recommended	Feasible

Figura 5.3 - Tecnologias com capacidade para produzir a peça especificada

Verifica-se que a peça pode ser produzida pelas tecnologias de *Die Casting*/fundição injectada ou *Sand Casting*/fundição em areia. Há que escolher uma das duas tecnologias capazes de garantir as especificações desejadas.

Iremos considerar que a peça será produzida no tecnologia de fundição injectada, dado que as outras tecnologias alternativas não se encontrarem até à data da elaboração desta dissertação, contempladas nos estimadores disponíveis no programa e para o efeito deste estudo não estarem disponíveis todos os dados necessários à sua estimação.

5.3 Fase B - Avaliação do peso dos parâmetros no custo unitário

5.3.1 Parâmetros envolvidos na tecnologia analisada

Para dar início à análise é necessário introduzir no programa as respectivas características dimensionais bem como a introdução de todos os parâmetros envolvidos no processo para que possa ser determinado o custo total por peça.

Estes parâmetros serão descritos abaixo (ver Figura 5.4).

The screenshot displays a software interface for die casting simulation, divided into two main sections: 'Part Information' and 'Process Parameters'.

Part Information:

- Quantity:** 10000
- Material:** Aluminum A360.0, Die Cast (with a 'Browse...' button)
- Envelope X-Y-Z (in):** 7.874 x 7.874 x 1.575
- Max. wall thickness (in):** 0.394
- Projected area (in²):** 48.670 or 78.50 % of envelope
- Projected holes?:** Yes (selected)
- Quantity:** 1
- Total Area (in²):** 3.042 or 4.91 % of envelope
- Surface area (in²):** 156.474 (optional)
- Volume (in³):** 67.078 or 68.69 % of envelope
- Tolerance (in):** Very high precision (<= 0.002)
- Surface roughness:** Mechanical quality
- Complexity:** Very Simple (with a 'Show advanced complexity options' link)
- Tooling:**
 - Number of cavities: 1
 - Number of dies: 1
 - Die-making rate (\$/hr): 65

Process Parameters:

- Material:**
 - Defect rate (%): 0.005
 - Run quantity: 10,001
 - Material price (\$/lb): 1.88 (with an 'Override' button)
 - Part weight (lb): 6.49
 - Remelt ratio (%): 20
 - Include defects?: Yes (selected)
 - Cost to remelt (\$/lb): 0.94
 - Additives ratio (%): 0
 - Material markup (%): 25
- Production:**
 - Machine type: Cold chamber
 - Machine clamp force (tons): 400
 - Hourly rate (\$/hr): 115.00 (with an 'Override' button)
 - Machine setup time (hrs): 8
 - Machine uptime (%): 95
 - Post-processing time (hrs): 0
 - Production rate (parts/hr): 102
 - Production markup (%): 10

Figura 5.4 - Parâmetros especificados para a peça em alumínio injectado

Para poder responder a estas questões é necessário limitar as variáveis para que possamos identificar uma tendência ou um padrão nos custos envolvidos. Dos parâmetros

disponíveis, apenas três serão variáveis, já que os outros serão fixos pois não têm expressão para este caso de estudo. A Tabela 5.1, abaixo, apresenta os parâmetros e valores considerados.

Tabela 5.1 - Parâmetros considerados fixos e variáveis para a análise

Parâmetros Fixos	Parâmetros variáveis
<u>Material</u> / Material: Alumínio A360	<u>Quantidades a produzir</u> Foram escolhidos três quantidades a produzir: <ul style="list-style-type: none"> • 10000 unidades (valor mínimo para fundição em alumínio); • 100000 unidades • 500000 unidades (valor máximo permitido pelo programa para este processo)
<u>Envelope</u> / Invólucro (X-Y-Z in) - 8 x 8 x 8 [in]	<u>Tolerance / Tolerância (in)</u> Foram escolhidos três valores para a tolerância, valores estes previstos na aplicabilidade da tecnologia de fabrico de Fundição Injectada (ver Tabela 5.8): <ul style="list-style-type: none"> • <i>Not critica</i> / Não-crítica ($> 0.02 \mu\text{in}$); • <i>Moderate Precision</i> / Precisão moderada ($\leq 0.01 \mu\text{in}$); • <i>Very high precision</i> / Alta precisão ($\leq 0.002 \mu\text{in}$).
<u>Max.wall thickness</u> / Espessura máx. da parede (in) - 0,2	<u>Surface roughness</u> / Rugosidade superficial Foram escolhidos 3 valores para a qualidade do acabamento superficial que a peça deve apresentar: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Not critical</i> / Não-crítica; • <i>Mechanical quality</i> / Qualidade mecânica; • <i>Highest quality</i> / Alta qualidade.
<u>Projected area</u> / Área Projectada [in^2] 48,670	
<u>Surface Area</u> / Área da superfície da peça [in^2] 156,48	
<u>Volume</u> / Volume total da peça [in^3] 67,078	
<u>Complexity</u> / Complexidade : <i>Very simple</i> / Muito simples (É considerada uma peça muito simples, para efeitos de estimativa, toda aquela que apresente menos de dez características geométricas como por exemplo furos, chanfros, furos roscados, flanges).	

5.3.2 Influência da quantidade, da tolerância e do acabamento superficial no custo da peça

De modo a avaliar a influência das quantidades a produzir, das tolerâncias e acabamento superficial especificados, tendo em conta os pressupostos anteriores, foi realizada uma estimativa combinando as variações possíveis destas três variáveis.

Após a introdução dos parâmetros, foram recolhidos os valores calculados e procedeu-se à compilação dos resultados obtidos através do programa de estimação de custos utilizado. Estes resultados podem ser consultados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos para as 9 combinações de quantidade, tolerância e acabamento superficial para produções de 10 000, 100 000 e 500 000 unidades [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo Total	Custo unitário	Custo Ferramentas	Custo Ferramentas unitário	Custo Produção	Custo Produção unitário	Custo Total Material	Custo Material unitário
10000		NC	214791	21,48	36603	3,660	13394	1,339	164794	16,479
	NC	MQ	218428	21,84	40239	4,024	13394	1,139	164794	16,479
		HQ	225690	22,57	47502	4,750	13394	1,139	164794	16,479
		NC	222060	22,21	43872	4,387	13394	1,339	164794	16,479
	MP	MQ	225690	22,57	47502	4,750	13394	1,139	164794	16,479
		HQ	232943	23,29	54754	5,475	13394	1,139	164794	16,479
		NC	229318	22,93	51129	5,113	13394	1,139	164794	16,479
	VHP	MQ	232943	23,29	54754	5,475	13394	1,139	164794	16,479
		HQ	240187	24,02	61999	6,200	13394	1,139	164794	16,479
100000		NC	1804234	18,04	55918	0,056	100404	1,004	1647913	16,479
	NC	MQ	1810780	18,11	62463	0,625	100404	1,004	1647913	16,479
		HQ	1820245	18,20	47505	0,475	124827	1,248	1647913	16,479
		NC	1816615	18,17	43875	0,439	124827	1,248	1647913	16,479
	MP	MQ	1820245	18,20	47505	0,475	124827	1,248	1647913	16,479
		HQ	1827498	18,28	54758	0,548	124827	1,248	1647913	16,479
		NC	1823872	18,24	51132	0,511	124827	1,248	1647913	16,479
	VHP	MQ	1827498	18,28	54758	0,548	124827	1,248	1647913	16,479
		HQ	1834742	18,35	62002	0,620	124827	1,248	1647913	16,479
500000		NC	8833035	17,17	114034	0,228	479433	0,959	8239568	16,479
	NC	MQ	8846672	17,69	127671	0,255	479433	0,959	8239568	16,479
		HQ	8873908	17,75	154908	0,310	479433	0,959	8239568	16,479
		NC	8860296	17,72	141295	0,283	479433	0,959	8239568	16,479
	MP	MQ	8873908	17,75	154,908	0,310	479433	0,959	8239568	16,479
		HQ	8901106	17,80	182105	0,364	479433	0,959	8239568	16,479
		NC	8887511	17,78	168511	0,337	479433	0,959	8239568	16,479
	VHP	MQ	8901106	17,80	182105	0,364	479433	0,959	8239568	16,479
		HQ	8928273	17,86	209273	0,419	479433	0,959	8239568	16,479

Legenda:

NC Not Critical/Não-crítica

MP Moderate Precision/Precisão moderada

VHP Very High Precision/ Alta precisão

NC Not Critical/Não-crítica

MQ Mechanical Quality/Qualidade mecânica

HQ Highest Quality/Alta qualidade

De seguida pôde criar-se um gráfico de superfície relacionando os valores da Quantidade VS Acabamento superficial VS Tolerância:

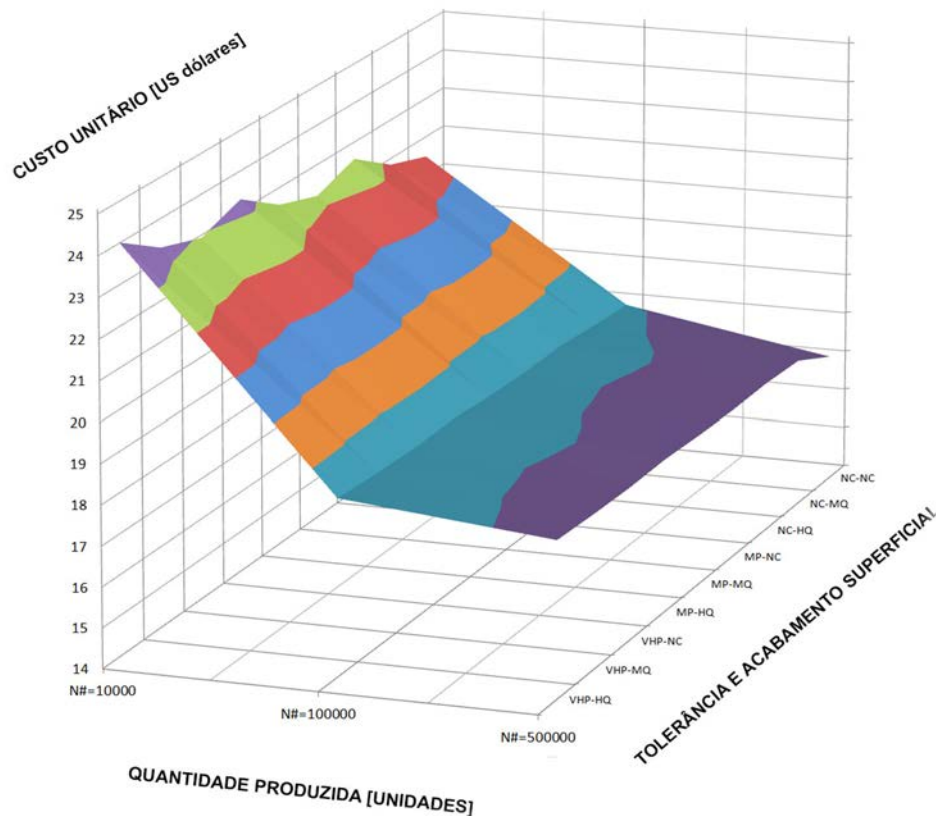


Figura 5.5 - Custo unitário VS quantidade produzida VS tolerância e acabamento superficial da peça de referência considerada para 10 000, 100 000 e 500 000 unidades

Por análise gráfica torna-se evidente que:

- I. Para quantidades produzidas acima das 100 000 unidades, a qualidade do acabamento superficial bem como as variações da tolerância acabam por ter expressão quase nula uma vez que as quantidades são elevadas resultando que os custos inerentes ao melhor acabamento e tolerância mais apertada acabam diluídos e pouca ou nenhuma influência têm no custo final de cada peça produzida. Consequentemente, deixam de ser um factor de decisão tão importante como o acabamento ou a tolerância a especificar;
- II. Para quantidades inferiores a 100 000 unidades estas variações não apresentam um comportamento uniforme e quanto mais pequena a quantidade produzida maior é o impacto da alteração da tolerância e acabamento superficial no custo final da peça;
- III. Será pertinente considerar uma quantidade de produção limitada a 100 000 unidades procurando avaliar com mais pormenor o que acontece entre as 10 000 unidades e as 100 000 unidades.

5.3.3 Análise de influências e adequação de gamas

Como constatámos na análise anterior, é pertinente explorar uma gama de valores mais baixa, isto é, produções de menor quantidade. Iremos analisar o mesmo objecto de estudo considerando agora quantidades entre 10 000 e 100 000 unidades, com valores intermédios, de modo a melhor compreender o que influencia mais o custo final da peça.

Assim, o mesmo estudo foi realizado para as seguintes quantidades: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos para quantidade, tolerância e acabamento superficial para produções de 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo Total	Custo unitário	Custo Ferramentas	Custo Ferramentas unitário	Custo Produção	Custo Produção unitário	Custo Total Material	Custo Material unitário
10000		NC	214791	21,48	36603	3,660	13394	1,339	164794	16,479
	NC	MQ	218428	21,84	40239	4,024	13394	1,139	164794	16,479
		HQ	225690	22,57	47502	4,750	13394	1,139	164794	16,479
		NC	222060	22,21	43872	4,387	13394	1,339	164794	16,479
	MP	MQ	225690	22,57	47502	4,750	13394	1,139	164794	16,479
		HQ	232943	23,29	54754	5,475	13394	1,139	164794	16,479
		NC	229318	22,93	51129	5,113	13394	1,139	164794	16,479
	VHP	MQ	232943	23,29	54754	5,475	13394	1,139	164794	16,479
25000		HQ	240187	24,02	61999	6,200	13394	1,139	164794	16,479
		NC	480551	19,22	36603	1,464	31996	1,279	411982	16,479
	NC	MQ	484188	19,37	40239	1,610	31996	1,279	411982	16,479
		HQ	491450	19,66	47502	1,900	31996	1,279	411982	16,479
		NC	487821	19,51	43872	1,755	31966	1,279	411982	16,479
	MP	MQ	491450	19,66	47502	1,900	31966	1,279	411982	16,479
		HQ	498703	19,95	54754	2,190	31966	1,279	411982	16,479
		NC	495078	19,80	51129	2,045	31966	1,279	411982	16,479
50000	VHP	MQ	498703	19,95	54754	2,190	31966	1,279	411982	16,479
		HQ	505947	20,24	61999	2,480	31966	1,279	411982	16,479
		NC	923479	18,47	36603	0,732	62920	1,258	823956	16,479
	NC	MQ	927115	18,54	40239	0,805	62920	1,258	823956	16,479
		HQ	934378	18,69	47502	0,950	62920	1,258	823956	16,479
		NC	930748	18,62	43872	0,877	62920	1,258	823956	16,479
	MP	MQ	934378	18,69	47502	0,950	62920	1,258	823956	16,479
		HQ	941630	18,83	54754	1,095	62920	1,258	823956	16,479
75000		NC	938005	18,76	51129	1,023	62920	1,258	823956	16,479
	VHP	MQ	941630	18,83	54754	1,095	62920	1,258	823956	16,479
		HQ	948875	18,98	61999	1,240	62920	1,258	823956	16,479
		NC	1366407	18,22	36603	0,488	93873	1,252	1235931	16,479
	NC	MQ	1370043	18,27	40239	0,537	93873	1,252	1235931	16,479
		HQ	1377306	18,36	47502	0,633	93873	1,252	1235931	16,479
		NC	1373676	18,32	43872	0,585	93873	1,252	1235931	16,479
	MP	MQ	1377306	18,36	47502	0,633	93873	1,252	1235931	16,479
100000		HQ	1384558	18,46	54754	0,730	93873	1,252	1235931	16,479
		NC	1380933	18,41	51129	0,682	93873	1,252	1235931	16,479
	VHP	MQ	1384558	18,46	54754	0,730	93873	1,252	1235931	16,479
		HQ	1391802	18,56	61999	0,827	93873	1,252	1235931	16,479
		NC	1804234	18,04	55918	0,056	100404	1,004	1647913	16,479
	NC	MQ	1810780	18,11	62463	0,625	100404	1,004	1647913	16,479
		HQ	1820245	18,20	47505	0,475	124827	1,248	1647913	16,479
		NC	1816615	18,17	43875	0,439	124827	1,248	1647913	16,479
	MP	MQ	1820245	18,20	47505	0,475	124827	1,248	1647913	16,479
		HQ	1827498	18,28	54758	0,548	124827	1,248	1647913	16,479
		NC	1823872	18,24	51132	0,511	124827	1,248	1647913	16,479
	VHP	MQ	1827498	18,28	54758	0,548	124827	1,248	1647913	16,479
		HQ	1834742	18,35	62002	0,620	124827	1,248	1647913	16,479

Com os novos dados, podemos agora criar o gráfico de superfície referente ao custo final de cada peça, relacionando os valores da Quantidade VS Acabamento superficial VS Tolerância para quantidades produzidas entre as 10 000 e as 100 000 unidades.

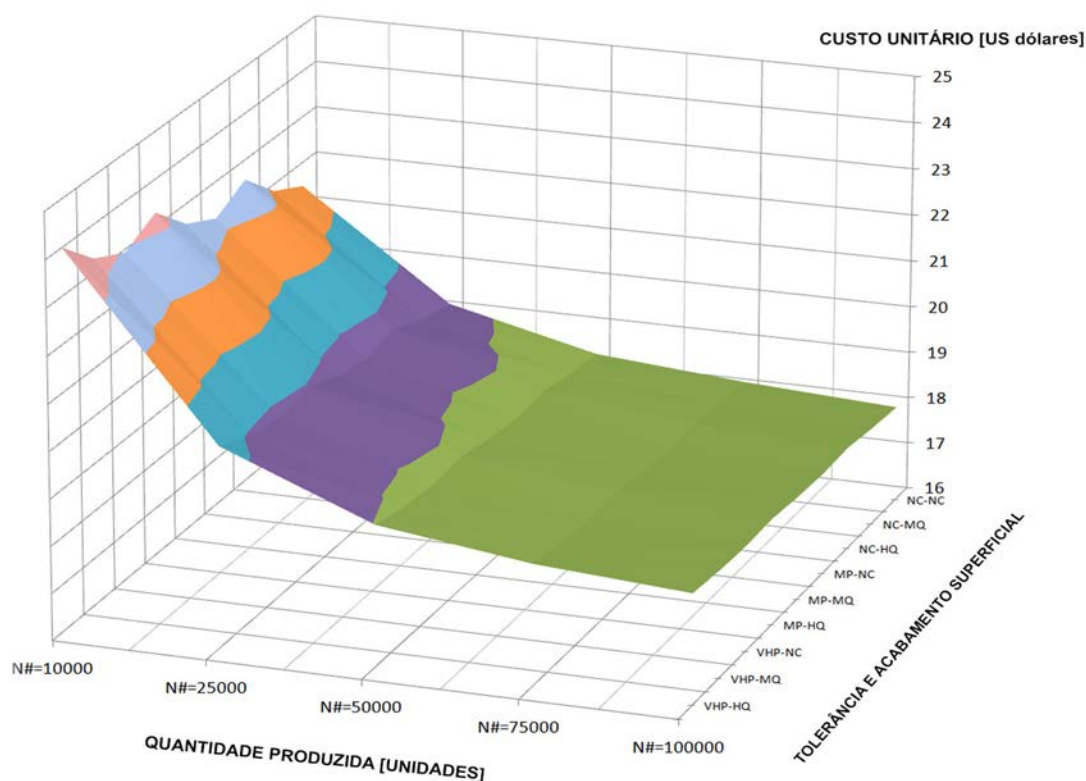


Figura 5.6 - Custo unitário VS quantidade produzida VS tolerância e acabamento superficial da peça de referência para 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades

Por análise dos valores obtidos e do gráfico da Figura 5.6 que os relaciona constata-se que:

- I. Na situação em que são pequenas as quantidades a produzir os valores da tolerância e acabamento especificados têm impacto no custo da peça. Com o aumento de 10 000 para 25 000 unidades produzidas, o valor do custo total por cada peça apresenta um decréscimo 11%, ou seja, de 2,54 dólares por peça (24,02 dólares para alta precisão e alta qualidade de acabamento, para 21,48 dólares para peças com tolerância e acabamento superficial não-críticos);
- II. É para uma produção de 10 000 unidades que é notório o aumento do custo provocado pela alteração da tolerância. É a situação mais susceptível a incrementos no custo. Como a quantidade a produzir é reduzida, quaisquer variações em termos de tolerância ou qualidade de acabamento superficial têm maior influência no custo da peça;
- III. Para quantidades a produzir entre as 25 000 (onde o valor médio do custo por peça é de 19,71 dólares) e as 50 000 (onde o valor médio do custo por peça é de 18,71 dólares) temos um decréscimo médio de 1 dólar por peça, isto é: um decréscimo de 5,07% no custo final da peça;

- IV. Para quantidades produzidas superiores a 50000 unidades quer a qualidade da tolerância quer a do acabamento superficial passam a ser factores não-determinantes na decisão pois o seu peso no custo total da peça está de tal modo diluído que podemos considerar que o custo é praticamente constante e a sua variação praticamente nula.

Podemos afirmar que o primeiro constrangimento à decisão será sempre a resposta à pergunta:

"Que quantidade pretendemos produzir?"

É com consciência da quantidade a ser produzida que o engenheiro poderá decidir mediante as tecnologias disponíveis qual a que melhor se adequa ao trabalho a realizar, se será necessário recorrer a empresas externas e como se poderá munir de argumentos face à informação que tiver disponível que lhe permitam ajudar à decisão da administração de investir em nova maquinaria ou em novas tecnologias de fabrico.

É pertinente tentar compreender o que acontecerá para o caso em que façamos variar apenas a tolerância que a peça deve apresentar, mantendo a qualidade do acabamento superficial fixo.

5.3.3.1 Influência da tolerância e do acabamento superficial da tolerância e do acabamento superficial

Para esta análise, o acabamento superficial foi especificado como sendo de qualidade mecânica (*mechanical quality*) por ser um valor médio para a qualidade do acabamento.

Variar-se-ão os valores da tolerância de modo a compreender melhor qual a influência da tolerância no custo total da peça. O estudo será realizado para quantidades de 10 000 a 500 000 unidades, abrangendo assim um leque de quantidades mais vasto para que seja possível identificar a partir de que quantidades produzidas a sua importância prevalece como factor de decisão aquando do projecto da peça. A Tabela 5.4 contém os valores calculados.

Tabela 5.4 - Variação do valor da tolerância para acabamento superficial fixo em qualidade mecânica

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo Total	Custo unitário	Custo Ferramentas	Custo Ferramentas unitário	Custo Produção	Custo Produção unitário	Custo Total Material	Custo Material unitário
10000	NC	MQ	218428	21,84	40239	4,024	13394	1,139	164794	16,479
	MP	MQ	225690	22,57	47502	4,750	13394	1,139	164794	16,479
	VHP	MQ	232943	23,29	54754	5,475	13394	1,139	164794	16,479
25000	NC	MQ	484188	19,37	40239	1,610	31996	1,279	411982	16,479
	MP	MQ	491450	19,66	47502	1,900	31966	1,279	411982	16,479
	VHP	MQ	498703	19,95	54754	2,190	31966	1,279	411982	16,479
50000	NC	MQ	927115	18,54	40239	0,805	62920	1,258	823956	16,479
	MP	MQ	934378	18,69	47502	0,950	62920	1,258	823956	16,479
	VHP	MQ	941630	18,83	54754	1,095	62920	1,258	823956	16,479
75000	NC	MQ	1370043	18,27	40239	0,537	93873	1,252	1235931	16,479
	MP	MQ	1377306	18,36	47502	0,633	93873	1,252	1235931	16,479
	VHP	MQ	1384558	18,46	54754	0,730	93873	1,252	1235931	16,479
100000	NC	MQ	1810780	18,11	62463	0,625	100404	1,004	1647913	16,479
	MP	MQ	1820245	18,20	47505	0,475	124827	1,248	1647913	16,479
	VHP	MQ	1827498	18,28	54758	0,548	124827	1,248	1647913	16,479
500000	NC	MQ	8846672	17,69	127671	0,255	479433	0,959	8239568	16,479
	MP	MQ	8873908	17,75	154,908	0,310	479433	0,959	8239568	16,479
	VHP	MQ	8901106	17,80	182105	0,364	479433	0,959	8239568	16,479

LEGENDA

Complexidade	VS	Very Simple / Muito simples
	M	Moderate / Moderada
	VC	Very Complex / Muito Complexa
Tolerância	NC	Not Critical / Não-crítica
	MP	Moderate Precision / Precisão moderada
	VHP	Very High Precision / Alta precisão
Qualidade do acabamento superficial	NC	Not Critical / Não-crítica
	MQ	Mechanical Quality / Qualidade mecânica
	HQ	Highest Quality / Alta qualidade

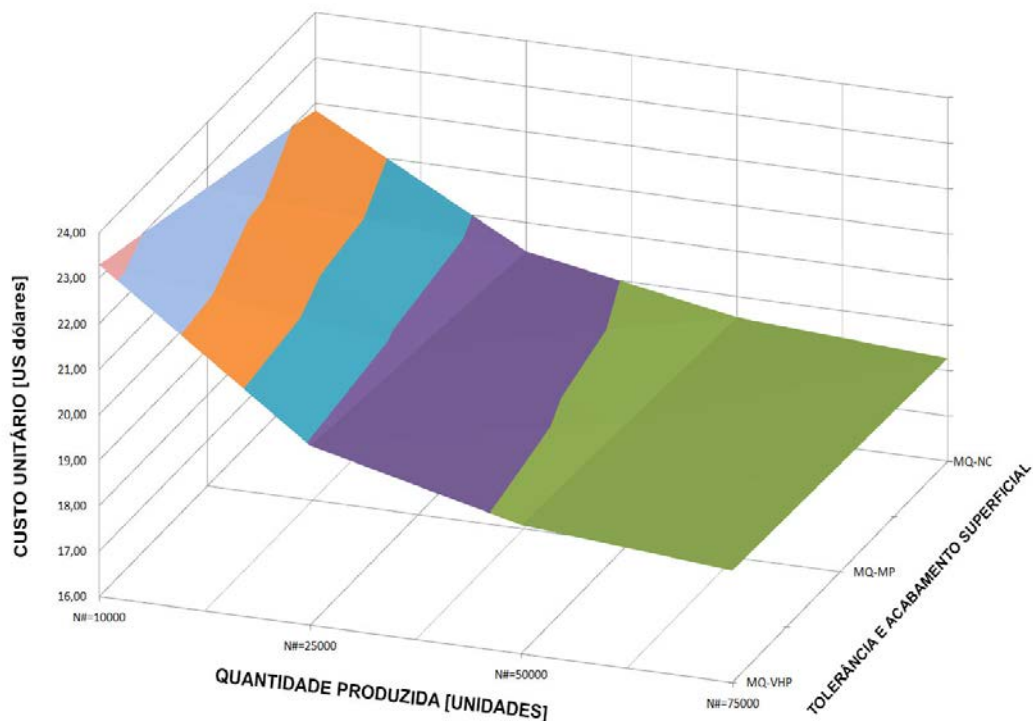


Figura 5.7 - Custo unitário VS tolerância variável e acabamento superficial da peça fixo para 10 000, 25 000, 50 000 e 75 000 unidades produzidas

Tabela 5.5 - Resumo do Custo de cada peça para diferentes quantidades a produzir e diferentes qualidades de tolerância

Qualidade\Produção	10 000	25 000	50 000	75 000
MQ-NC	21,84	19,37	18,54	18,27
MQ-MP	22,57	19,66	18,69	18,36
MQ-VHP	23,29	19,95	18,83	18,46

Pela análise dos dados compilados na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5 verifica-se que:

- I. Para 10 000 unidades produzidas e considerando a tolerância na qualidade NC (não crítica $>0.02 \mu\text{in}$), obtém-se um custo por peça de 21,84 dólares contra 23,29 dólares na qualidade VHP (Alta precisão $\leq 0.002 \mu\text{in}$). Estamos perante uma tolerância dez vezes mais precisa que a não-crítica, a que corresponde um aumento de 6,23% no custo total da peça;
- II. É no custo de ferramentas por peça que este aumento é mais expressivo: 4,024 dólares na qualidade NC (não crítica $>0.02 \mu\text{in}$) face aos 5,475 dólares para qualidade VHP (Alta precisão $\leq 0.002 \mu\text{in}$). Esta variação na qualidade da tolerância (de $0,02 \mu\text{in}$ para $0,002 \mu\text{in}$) corresponde a um acréscimo de 36,1% no custo das ferramentas necessárias ao fabrico de cada peça;
- III. Tendo em conta que o valor médio do custo por peça é de 22,57 dólares e que o valor médio do custo de ferramentas necessárias ao seu fabrico é de 4,75 dólares, pode constatar-se que neste caso, o custo de ferramentas representa cerca de 21,1% do custo total da peça;
- IV. Como era expectável, o intervalo de quantidade a produzir mais susceptível a variações é para produções entre 10 000 e 25 000 unidades, representando um decréscimo de 11,3% no custo unitário para a mesma qualidade de tolerância e acabamento superficial;
- V. A partir das 50 000 unidades, a qualidade da tolerância deixa de ter este peso na balança final, já que o custo do incremento na qualidade, e o custo das ferramentas acaba por se diluir não tendo expressão, dada a grande quantidade produzida;
- VI. A mesma conclusão pode ser feita para produções entre as 50 000 e as 500 000 unidades (limite máximo permitido pelo programa).

As ferramentas necessárias para garantir o fabrico com uma tolerância mais apertada representam cerca de um quarto do valor total da peça, pelo que a qualidade escolhida para a tolerância tem forte impacto e deve ser especificada tendo em conta a garantia dos requisitos funcionais, mas sempre que possível com a tolerância mais fácil de garantir, ou seja, o maior possível; sempre que seja prevista uma produção em pequena quantidade (inferior a 25 000 unidades).

"Que influência terá a alteração do grau de complexidade da peça no seu custo?"

De seguida será analisado o que acontece no caso de peças mais complexas.

5.3.3.2 Influência da complexidade da peça

Para esta análise, serão escolhidas três das cinco opções disponíveis para o grau de complexidade da peça. Este grau é determinado pelo número de *features*, isto é, pelo número de características geométricas que a peça apresenta, tais como o número de furos, a quantidade de rasgos, de abas, de diferentes espessuras, de chanfros, de paredes. Assim, e tendo em conta que já foi analisado o impacto da variação de tolerância e da variação de acabamento superficial, será verificado o que acontece quando a peça deixa de ser muito simples (*VS=Very simple*) e assume formas moderadamente complexas (*M=Moderate*), e muito complexas (*VC=Very complex*), utilizando qualidades médias de tolerância (precisão moderada $\leq 0,01 \mu\text{m}$) e de acabamento superficial (qualidade mecânica).

Tabela 5.6 - Influência da complexidade para parâmetros médios de acabamento superficial e tolerância

Quantidade	Complexidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo Total	Custo unitário	Custo Ferramentas	Custo Ferramentas unitário	Custo Produção	Custo Produção unitário	Custo Total Material	Custo Material unitário
10000	VS	MP	MQ	225690	22,569	47502	4,750	13394	1,139	164794	16,479
	M	MP	MQ	270423	27,042	91133	9,113	14496	1,45	164,794	16,479
	VC	MP	MQ	320949	30,295	122919	12,292	15236	1,524	164,794	16,479
25000	VS	MP	MQ	491450	19,658	47502	1,900	31966	1,279	411982	16,479
	M	MP	MQ	537837	21,513	91133	3,645	34722	1,389	411982	16,479
	VC	MP	MQ	557047	22,282	108494	1,463	36572	1,463	411982	16,479
50000	VS	MP	MQ	934378	18,688	47502	0,950	62920	1,258	823956	16,479
	M	MP	MQ	969068	19,381	76,681	1,535	68431	1,369	823956	16,479
	VC	MP	MQ	1004580	20,092	108494	2,17	72130	1,443	823956	16,479
75000	VS	MP	MQ	1377306	18,364	47502	0,633	93873	1,252	1235931	16,479
	M	MP	MQ	1414752	18,863	76681	1,022	102140	1,362	1235931	16,479
	VC	MP	MQ	1452133	19,362	108494	1,447	107689	1,436	1235931	16,479
100000	VS	MP	MQ	1820245	18,202	47505	0,475	124827	1,248	1647913	16,479
	M	MP	MQ	1860448	18,604	76685	0,767	135850	1,359	1647913	16,479
	VC	MP	MQ	1899661	18,997	108500	1,085	143,248	1,432	1647913	16,479
500000	VS	MP	MQ	8873908	17,748	154,908	0,310	479433	0,959	8239568	16,479
	M	MP	MQ	9056652	18,113	264333	0,529	552751	1,106	8239568	16,479
	VC	MP	MQ	9232246	18,464	383638	0,767	609040	1,218	8239568	16,479

LEGENDA

Complexidade	VS	Very Simple / Muito simples
	M	Moderate / Moderada
	VC	Very Complex / Muito Complexa
Tolerância	NC	Not Critical / Não-crítica
	MP	Moderate Precision / Precisão moderada
	VHP	Very High Precision / Alta precisão
Qualidade do acabamento superficial	NC	Not Critical / Não-crítica
	MQ	Mechanical Quality / Qualidade mecânica
	HQ	Highest Quality / Alta qualidade

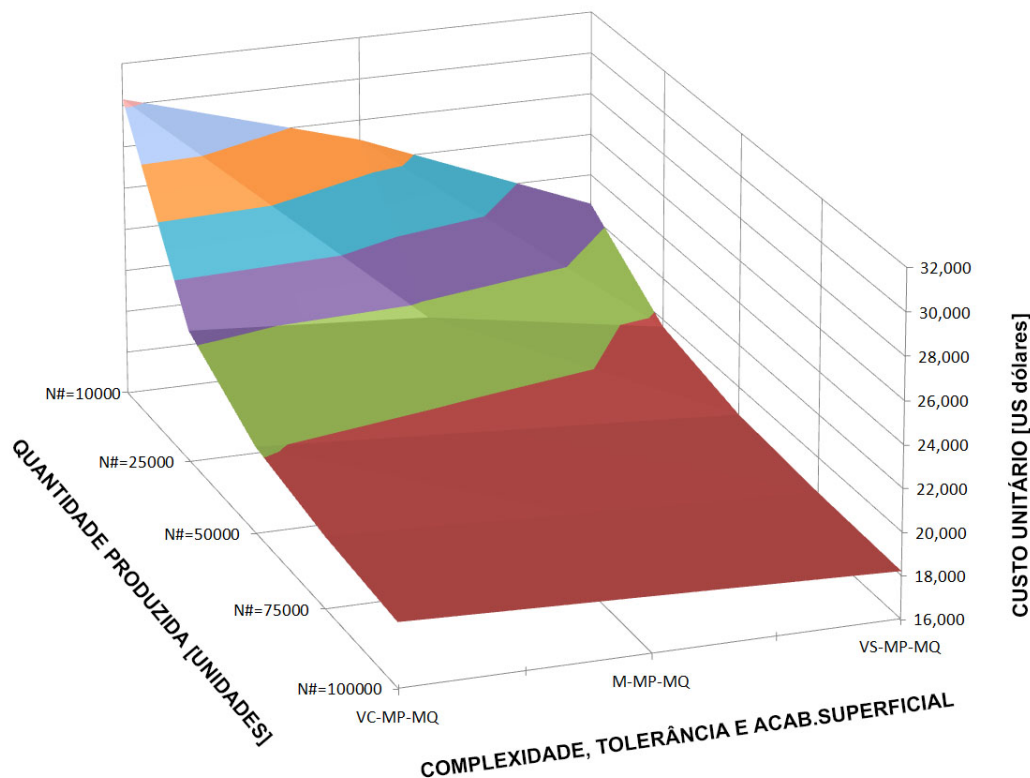


Figura 5.8 - Custo unitário VS quantidade produzida VS complexidade da peça para 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades a produzir

Tabela 5.7 - Resumo do custo de cada peça para diferentes quantidades a produzir, diferentes qualidades de tolerância e diferente complexidade

Qualidade\ Produção	10 000	25 000	50 000	75 000	100 000
VS-MP-MQ	22,569	19,658	18,688	18,364	18,202
M-MP-MQ	27,042	21,513	19,381	18,863	18,604
VC-MP-MQ	30,295	22,282	20,092	19,362	18,997
Valores em USD					

A análise confirma que uma peça simples é sempre mais barata, mais simples de produzir que uma peça complexa, com entalhes, pormenores.

Relembrando que foram considerada uma tolerância com precisão moderada ($\leq 0,01 \mu\text{in}$), e um acabamento superficial na qualidade mecânica, verifica-se que:

- I. Para 10 000 unidades produzidas de peças com grau de complexidade muito simples (VS), obtém-se um custo por peça de 22,57 dólares contra 27,04 dólares na qualidade M (complexidade moderada). Ao acrescentar-mos características geométricas à peça, a mesma sofre um aumento de 16,53% no seu custo total;
- II. Nas mesmas 10 000 unidades produzidas se considerarmos um grau de complexidade VC (muito complexa) a mesma sofre um aumento de 9,5% no seu custo total; face a uma peça moderadamente complexa;

- III. É no custo de Ferramentas por peça que este aumento é mais expressivo: 4,024 dólares na qualidade NC (não crítica $>0.02 \mu\text{in}$) face aos 5,475 dólares para qualidade VHP (Alta precisão $\leq 0.002 \mu\text{in}$). Esta variação na qualidade da tolerância (de $0.02 \mu\text{in}$ para $0.002 \mu\text{in}$) corresponde a um acréscimo de 36,1% no custo das ferramentas necessárias ao fabrico de cada peça;
- IV. Se tivermos em conta que o valor médio do custo por peça é de 22,57 dólares e que o valor médio do custo de ferramentas necessárias ao seu fabrico é de 4,75 dólares, podemos ver que neste caso, o custo de ferramentas representa cerca de 21,1% do custo total da peça;
- V. Como era expectável, o intervalo de quantidade a produzir mais susceptível a variações é para produções entre 10 000 e 25 000 unidades, representando um decréscimo de 11,3% no custo unitário para a mesma qualidade de tolerância e acabamento superficial;
- VI. A partir das 50 000 unidades, a qualidade da tolerância deixa de ter este peso na balança final, já que o custo do incremento na qualidade, e o custo das ferramentas acaba por se diluir não tendo expressão, dada a grande quantidade produzida;
- VII. A mesma conclusão pode ser feita para produções entre as 50 000 e as 500 000 unidades (limite máximo permitido pelo programa).

5.4 Fase C - Comparação entre fundição injectada e fundição em areia

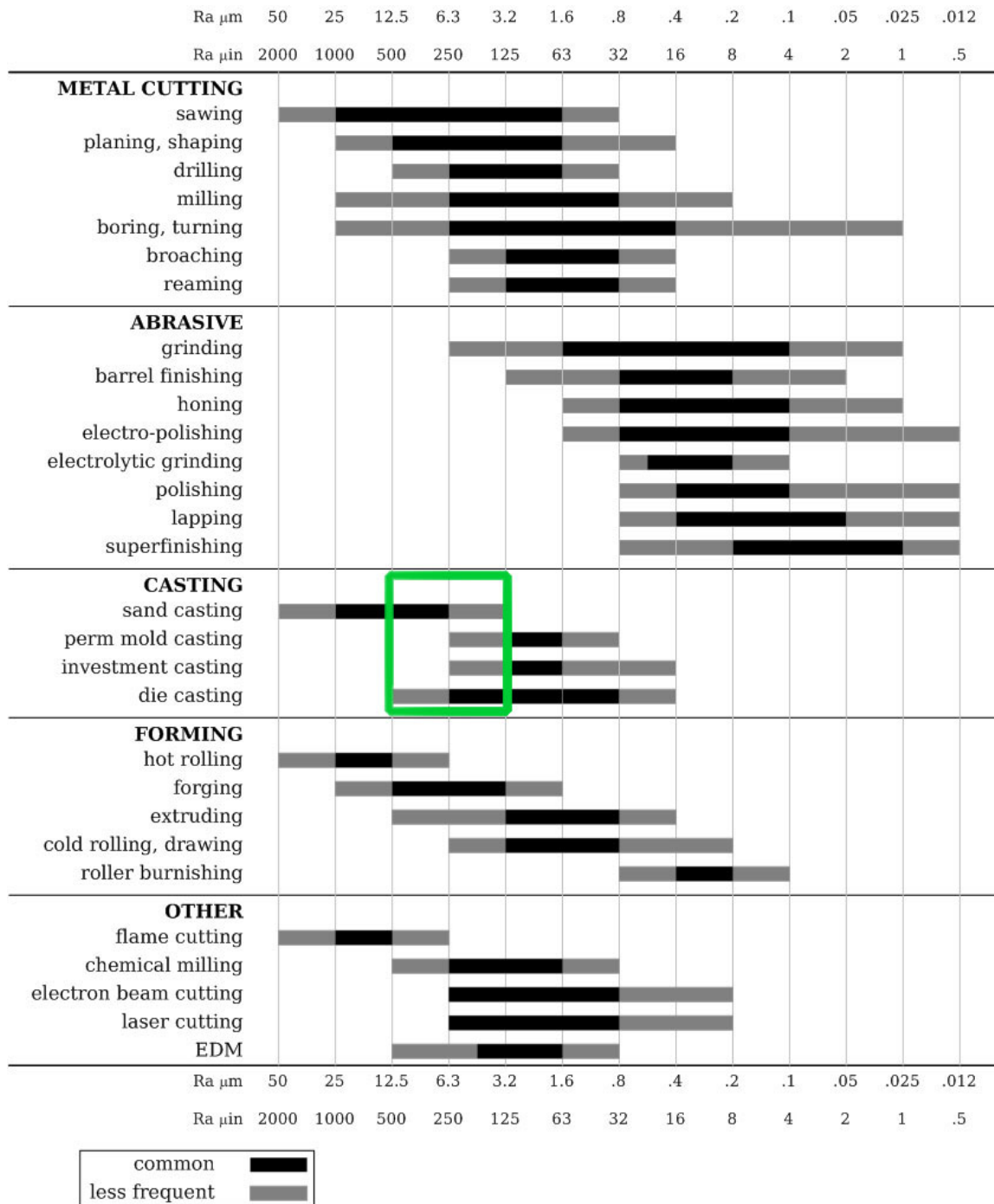
Vamos agora comparar os custos inerentes a duas tecnologias de fabrico diferentes para a mesma peça com o objectivo de verificar diferenças entre os custos de fabrico, ferramentas e custo por peça em cada uma delas.

No entanto, para que possam ser comparadas directamente, é necessário certificar-nos que ambas as tecnologias envolvidas possuam as mesmas capacidades de acabamento e tolerância. Assim, será efectuado um estudo comparativo entre *Die casting*/fundição injectada e *Sand casting*/fundição em molde de areia, já que tanto uma como outra tecnologia permitem a sua realização (ver Tabela 5.8).

Serão considerados valores médios de tolerância (moderada $<0,01 \mu\text{in}$) e acabamento superficial da peça (qualidade mecânica) para a fundição injectada para que possam ser comparáveis com os níveis de acabamento que a tecnologia de fundição em areia possibilita. Para valores de acabamento e tolerância mais elevados, obrigaria a que a peça depois de ser fundida tivesse de ser sujeita a nova maquinaria de forma a garantir a qualidade do acabamento pretendida, encarecendo inevitavelmente o custo total de fabrico da peça.

Cada tecnologia tem diferentes acabamentos de superfície típicos inerentes ao seu processo de fabrico respectivo, tal como indicado na Tabela 5.8 abaixo (Degarmo, Black & Kohser 2003, p.227):

Tabela 5.8 - Acabamentos superficiais típicos inerentes a cada tecnologia



Assim, e tendo em conta estes valores médios, vamos tentar avaliar qual o processo que envolve mais custos, como estes são influenciados pela quantidade produzida e qual o mais vantajoso nesta situação.

Sucintamente, a Tabela 5.9 e a Tabela 5.10 apresentam as características mais importantes das duas tecnologias consideradas, bem como os seus limites de aplicabilidade e aplicações mais comuns:

Tabela 5.9 - Características da tecnologia de fundição injectada

Características da tecnologia	Fundição injectada
Formas	De espessura fina: Complexas, Sólidos: cilíndricos complexos, cúbicos complexos (Planas, parede fina: Cilíndricas, Parede fina: Cúbicas)
Peso	Peso: 0.5 oz a 500 lb
Materiais	Metais, Alumínio, Chumbo, Magnésio, Latão, Zinco (Cobre)
Acabamento superficial - Ra (µin)	32 - 63, (16 - 125)
Tolerância (in.)	± 0.015 , (± 0.0005)
Espessura máxima da parede	0.05 - 0.5 , (0.015 - 1.5)
Quantidade	10000 - 1000000, (1000 - 1000000)
Prazo de conclusão	Meses
Vantagens	Permite produzir peças de grande dimensão, com formas complexas, de alta resistência, e com excelente grau de acabamento e tolerância. Tem taxa de produção elevada, baixo valor de mão-de-obra e as sobras podem ser recicladas
Desvantagens	É necessário recorte; Os preços do equipamento e das ferramentas são elevados; Tempo de vida útil limitado. Tempos de entrega elevados
Aplicações frequentes	Componentes para motores, para bombas, corpos de equipamentos para electrodomésticos

Tabela 5.10 - Características da tecnologia de fundição em areia

Características da tecnologia	Fundição em areia
Formas	De espessura fina: complexas, sólidos: cilíndricos complexos, cúbicos complexos, (Planas, parede fina: cilíndricas, Parede fina: cúbicas)
Peso	Peso: 1 oz - 450 toneladas
Materiais	Metais, Ligas de aço, aço carbono, ferro, aço inoxidável, Alumínio, Cobre, magnésio, Níquel (Chumbo, Latão, Titânio, Zinco)
Acabamento superficial - Ra (µin)	300 - 600 (125 - 2000)
Tolerância (in.)	± 0.03, (± 0.015)
Espessura máxima da parede (in.)	0.125 - 5, (0.09 - 40)
Quantidade	1 - 1000, (1 - 1000000)
Prazo de conclusão	Dias, (em certos casos, horas)
Vantagens	Consegue produzir peças de grande dimensão, com formas complexas. Muitos materiais disponíveis, Baixo custo de equipamento e ferramentas. Tempos de entrega curtos e sobras recicláveis
Desvantagens	Menor resistência do material, por vezes com altos níveis de porosidade. Acabamento superficial e tolerâncias baixas. É frequentemente necessário nova operação de maquinação no final para garantir as especificações. Baixa taxa de produção, custo de mão-de-obra elevado.
Aplicações frequentes	Blocos de motor, colectores, engrenagens, polias

Para que este comparativo possa ser realizado é necessário que a escolha do material da peça seja o mesmo ou outro que apresente as mesmas características.

Por esta razão, para o ensaio na tecnologia de fundição injectada (*Die casting*), foi escolhido um alumínio A360.0 e para o ensaio em fundição em areia (*Sand casting*) foi escolhido um alumínio C443.0. Ambos são amplamente utilizados nestas tecnologias de fabrico e apresentam densidades e custo (de matéria prima) muito semelhantes como pode ser visto na Figura 5.9 abaixo.



Figura 5.9 - Alumínios escolhidos para as tecnologias de fundição injectada e fundição em areia (www.custompart.net)

Para o comparativo entre estas duas tecnologias a peça especificada é uma caixa cúbica de parede fina (0,2 polegadas) com 8 polegadas de aresta, apresentada na Figura 5.10 abaixo:

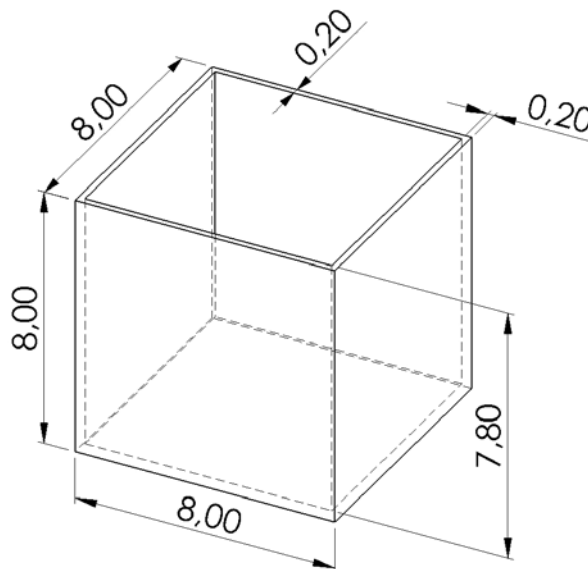


Figura 5.10 - Peça a estudar nas tecnologias de fundição injectada VS fundição em areia

Após a introdução dos parâmetros de fabrico, foi feita a selecção dos dados relevantes para este comparativo: Foram especificadas as características geométricas, o material da peça, o grau de acabamento superficial e a tolerância requeridas bem como as quantidades a produzir.

Na Tabela 5.11 e na Tabela 5.12 constam os valores dos custos que irão servir de termo de comparação entre as duas tecnologias.

Tabela 5.11 - Custos associados à produção da peça na tecnologia de fundição injectada [USD]

Quantidade [unidades]	FUNDIÇÃO INJECTADA					
	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10 000	225.320	22,53	13,92	1,68	6,03	0,91
25 000	460.075	18,40	13,92	1,61	2,41	0,46
50 000	851.350	17,03	13,92	1,59	1,21	0,31
75 000	1.242.675	16,57	13,92	1,58	0,80	0,26
100 000	1.637.100	16,37	13,92	1,58	0,63	0,24

Tabela 5.12 - Custos associados à produção da peça na tecnologia de fundição em areia [USD]

Quantidade [unidades]	FUNDIÇÃO EM AREIA					
	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10 000	188.030	18,90	14,95	3,20	0,65	0,00*
25 000	472.325	18,89	14,95	3,20	0,75	0,00*
50 000	932.200	18,64	14,95	3,20	0,50	0,00*
75 000	1.385.700	18,48	14,95	3,19	0,33	0,00*
100 000	1.839.300	18,39	14,95	3,19	0,25	0,00*

*O processo de fundição em areia garante a qualidade de acabamento requerida pelo que não há necessidade de recorrer a acabamento posterior daí o custo do acabamento ser nulo

Podemos agora analisar de forma directa o comportamento dos custos inerentes a estas duas tecnologias de fabrico. Iremos comparar e tentar compreender que variações existem no custo de cada peça, no custo das ferramentas necessárias e no custo de produção da peça. Iremos procurar identificar a partir de que quantidade a produzir a escolha entre uma ou outra tecnologia deixa de ser um factor determinante, ou seja, a pergunta que se coloca é:

"A partir de que quantidade uma tecnologia deixa de ser a mais viável em termos de economia de custos e outra se torna melhor opção?"

5.4.1 Comparativo do custo unitário

Vejamos o comportamento do custo por peça em função da quantidade produzida e da tecnologia de fabrico disponível:

A Tabela 5.13, abaixo, compila os resultados obtidos para os valores do custo por peça nas duas tecnologias de fabrico.

Tabela 5.13 - Comparativo custo por peça - fundição injectada VS fundição em areia [USD]

Tecnologia\Produção	10 000	25 000	50 000	75 000	100 000
Fundição injectada	22,53	18,40	17,03	16,57	16,37
Fundição em areia	18,90	18,86	18,64	18,48	18,39
Diferença USD	3,63	-0,46	-1,62	-1,91	-2,02
Diferença %	-16,1%	2,5%	9,5%	11,5%	12,4%

Por análise da Figura 5.11 podemos concluir que:

- I. Para 10 000 unidades produzidas, em termos unitários, o custo de fabrico da peça pelo processo de fundição em areia é de 18,90 dólares contra 22,53 dólares relativos à fundição injectada;
- II. Para as 10 000 unidades produzidas, o processo de fundição em areia apresenta um custo total de 188 030 dólares face aos 225 320 dólares pelo processo de fundição injectada. Tendo em conta estamos a falar da mesma peça, das mesmas características geométricas, tolerâncias e acabamento, estamos perante uma diferença de 37 290 dólares (em termos globais). Esta diferença representa uma poupança de 16,1% relativamente ao fabrico por fundição injectada, ou seja, para esta quantidade é mais barato produzir a peça por injeção em molde de areia pelo que esta deverá ser a tecnologia a adoptar para o fabrico desta peça;
- III. A partir das 22 000 unidades (aproximadamente), constata-se que deixa de ser vantajoso o processo de fundição em areia, já que com o aumentar da produção, o custo unitário começa a diluir-se e o processo de fundição injectada passa a ser o mais barato, aumentando a sua economia com o aumento da quantidade a produzir. Esta economia atinge os 12,4% para 100 000 unidades, representando uma poupança de 202 200 dólares.

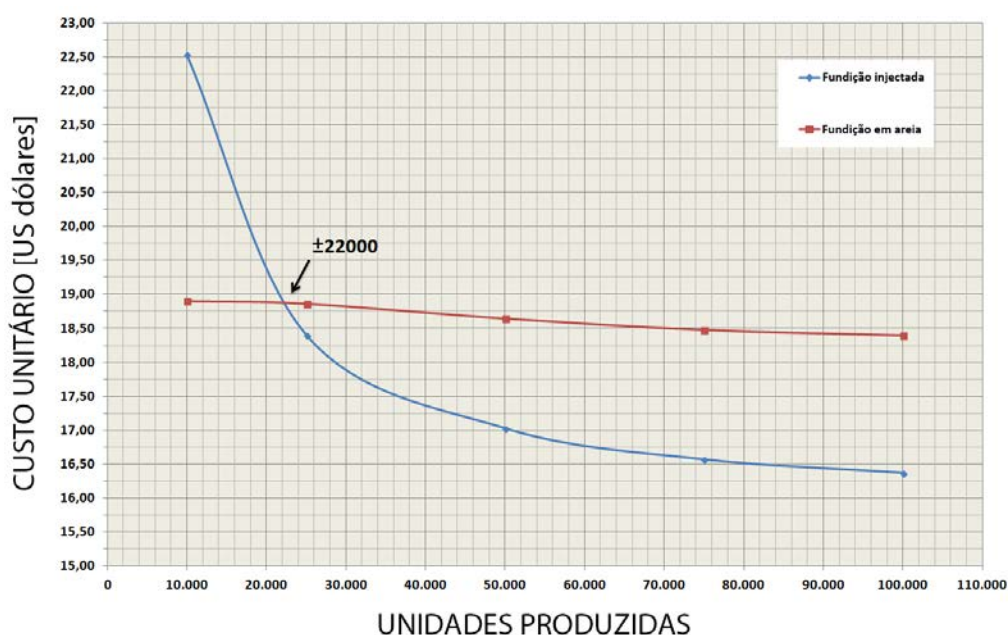


Figura 5.11 - Custo por peça - Comparativo entre fundição injectada e fundição em areia [USD]

5.4.2 Comparativo do custo de ferramentas

Vejamos o comportamento do custo de ferramentas por peça para as duas tecnologias (ver Figura 5.12). Podemos concluir que:

- I. Para 10 000 unidades produzidas, em termos unitários, o custo das ferramentas necessárias para a produção da peça pelo processo de fundição em areia é de 0,75 dólares contra 6,03 dólares relativos à fundição injectada. Para esta quantidade esta diferença representa uns expressivos 88% de poupança da tecnologia de fundição em areia face à fundição injectada;
- II. Ao contrário do custo por peça, o custo de ferramentas pelo processo de fundição em areia é sempre mais barato, independentemente da quantidade a produzir, vantagem esta, que se dilui com o aumentar da produção, mas ainda assim representando uma poupança de 61% face à fundição injectada.

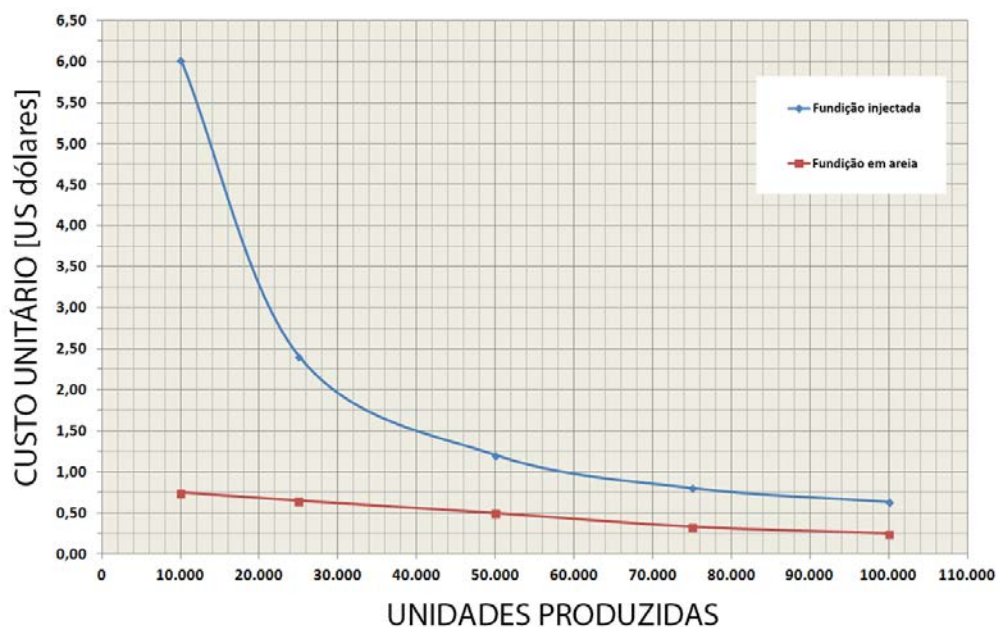


Figura 5.12 - Custo de ferramentas por peça - Comparativo entre fundição injectada e fundição em areia [USD]

5.4.3 Comparativo do custo de produção

Na Figura 5.13 podemos observar os valores dos custos de produção por peça obtidos para as duas tecnologias. Estes valores permitem-nos comparar as diferenças inerentes à escolha entre uma ou outra tecnologia:

- I. O custo de produção associado ao processo de fundição em areia, é, independentemente da quantidade a produzir, mais caro que na fundição injectada (sensivelmente o dobro). Assim, e apesar desta diferença, podemos afirmar que é praticamente linear o comportamento dos custos de produção nas duas tecnologias e que este comportamento se mantém para qualquer quantidade produzida.

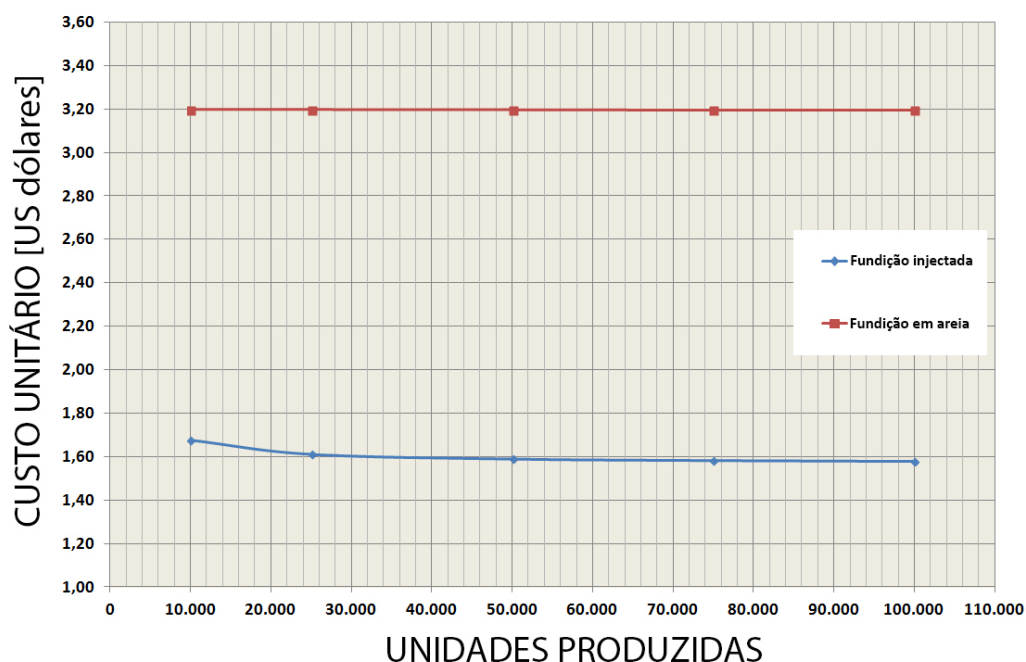


Figura 5.13 - Custo de produção por peça - Comparativo entre fundição injectada e fundição em areia [USD]

5.4.4 Conclusão

Pelas razões acima citadas, a decisão correcta é a optar por produzir a peça na tecnologia de fundição em areia para quantidades inferiores a 22 000 unidades e optar pela tecnologia de fundição injectada para o fabrico de quantidades superiores a 22 000 unidades (ver Tabela 5.11, Tabela 5.12 e Tabela 5.13).

5.5 Fase D - Avaliação do custo unitário em função da complexidade da peça

Nesta fase, iremos avaliar como as características geométricas e como o consequente aumento da complexidade da peça, influenciam o seu custo final.

Para tal serão analisados dez casos de estudo a partir de uma peça base à qual serão acrescentadas características geométricas que permitam concluir quanto aos parâmetros que mais encarecem o seu custo.

Iremos procurar apurar a veracidade da afirmação:

"Uma peça mais complexa custa necessariamente mais que uma peça mais simples."

5.5.1 Caso de estudo 1 - Caixa simples

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.14).

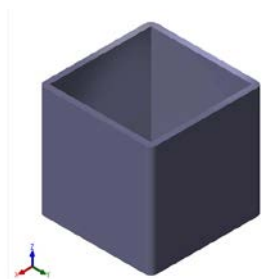


Figura 5.14 - Caixa simples

Material : Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura da parede: 0,2 polegadas

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Custos de fabrico de uma caixa simples - Fundição injectada [USD]

Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	225.320	22,532	21,624	13,922	1,676	6,026	0,908
25000			460.075	18,403	17,942	13,922	1,610	2,410	0,461
50000			851.350	17,027	16,715	13,922	1,588	1,205	0,312
75000			1.242.675	16,569	16,306	13,922	1,581	0,803	0,263
100000			1.637.100	16,371	16,133	13,922	1,577	0,634	0,238

5.5.2 Caso de estudo 2 - Caixa simples com furo na base

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.15).

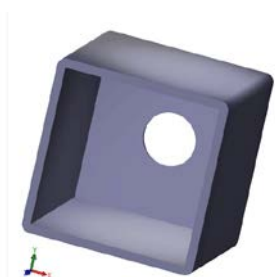


Figura 5.15 - Caixa com furo na base

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura da parede: 0,2 polegadas

Diâmetro do furo: 2 polegadas

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.15.

Tabela 5.15 - Custos de fabrico de uma caixa com furo na base - Fundição injectada [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	224.140	22,414	21,490	13,785	1,680	6,025	0,924
25000			456.900	18,276	17,809	13,785	1,614	2,410	0,467
50000			844.850	16,897	16,582	13,785	1,592	1,205	0,315
75000			1.232.850	16,438	16,173	13,785	1,584	0,803	0,265
100000			1.623.900	16,239	16,000	13,785	1,581	0,634	0,239

5.5.3 Caso de estudo 3 - Caixa com aba lateral

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.16).

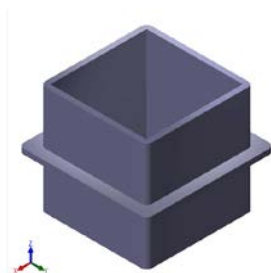


Figura 5.16 - Caixa com aba lateral

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura da parede: 0,2 polegadas

Espessura da aba: 0,2 polegadas

Largura da aba: 0,5 polegadas

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Custos de fabrico de uma caixa com aba lateral - Fundição injectada [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	235.050	23,505	22,547	14,534	1,681	6,332	0,958
25000			479.200	19,168	18,682	14,534	1,615	2,533	0,486
50000			886.100	17,722	17,393	14,534	1,593	1,266	0,329
75000			1.293.075	17,241	16,964	14,534	1,586	0,844	0,277
100000			1.730.300	17,303	16,782	14,534	1,582	0,667	0,521

5.5.4 Caso de estudo 4 - Caixa com 2 furos laterais

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.17).

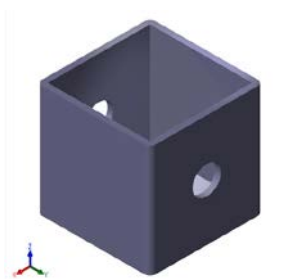


Figura 5.17 - Caixa com dois furos laterais

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura máxima da parede: 0,2 polegadas

Diâmetro dos furos: 2 polegadas

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Custos de fabrico de uma caixa com dois furos laterais - Fundição injectada [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	236.780	23,678	22,290	13,626	1,809	7,501	1,388
25000			469.100	18,764	18,111	13,626	1,743	2,742	0,653
50000			856.300	17,126	16,718	13,626	1,721	1,371	0,408
75000			1.243.575	16,581	16,254	13,626	1,714	0,914	0,327
100000			1.634.400	16,344	16,058	13,626	1,710	0,722	0,286

5.5.5 Caso de estudo 5 - Caixa com 4 furos laterais

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.18).

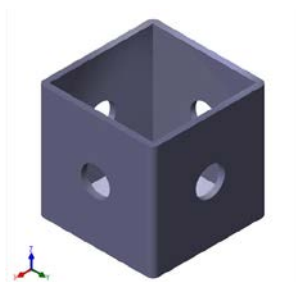


Figura 5.18 - Caixa com quatro furos laterais

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura máxima da parede: 0,2 polegadas

Diâmetro dos furos: 2 polegadas

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Custos de fabrico de uma caixa com quatro furos laterais - Fundição injectada [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	269.050	26,905	25,037	13,520	1,912	7,601	1,868
25000			532.875	21,315	20,470	13,520	1,846	3,001	0,845
50000			972.600	19,452	18,948	13,520	1,824	1,500	0,504
75000			1.412.325	18,831	18,440	13,520	1,817	1,000	0,391
100000			1.856.000	18,560	18,226	13,520	1,813	0,790	0,334

5.5.6 Caso de estudo 6 - Caixa com rasgos verticais

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.19).

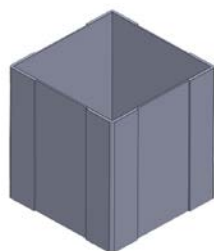


Figura 5.19 - Caixa com quatro rasgos verticais

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura máxima da parede: 0,2 polegadas

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 - Custos de fabrico de uma caixa com quatro rasgos verticais - Fundição injectada [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	238.600	23,860	20,196	10,801	1,791	9,295	1,973
25000			428.275	17,131	16,244	10,801	1,725	3,718	0,887
50000			744.400	14,888	14,363	10,801	1,703	1,859	0,525
75000			1.060.575	14,141	13,736	10,801	1,696	1,239	0,405
100000			1.381.500	13,815	13,471	10,801	1,692	0,978	0,344

5.5.7 Caso de estudo 7 - Caixa com rasgo longitudinal

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.20).

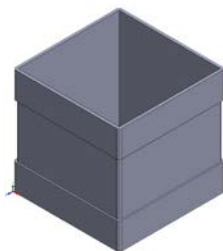


Figura 5.20 - Caixa com rasgo longitudinal

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura máxima da parede: 0,2 polegadas

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 - Custos de fabrico de uma caixa com rasgo longitudinal - Fundição injectada [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	247.550	24,755	22,771	10,801	1,794	9,931	2,229
25000			437.625	17,505	16,746	10,801	1,727	3,973	1,004
50000			754.350	15,087	14,738	10,801	1,705	1,986	0,595
75000			1.071.150	14,282	14,069	10,801	1,698	1,324	0,459
100000			1.393.100	13,931	13,786	10,801	1,694	1,045	0,391

5.5.8 Caso de estudo 8 - Caixa com rasgo longitudinal e 12 furos

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.21).

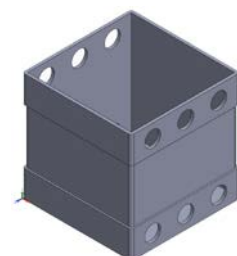


Figura 5.21 - Caixa com rasgo longitudinal e 12 furos

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura máxima da parede: 0,2 polegadas

Diâmetro dos furos: 1 polegada

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.21:

Tabela 5.21 - Custos de fabrico de uma caixa com rasgo longitudinal e 12 furos - Fundição injectada [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	261.190	26,119	23,734	10,448	1,957	11,329	2,385
25000			448.400	17,936	16,870	10,448	1,891	4,531	1,066
50000			760.450	15,209	14,583	10,448	1,869	2,266	0,626
75000			1.072.425	14,299	13,820	10,448	1,861	1,510	0,480
100000			1.390.600	13,906	13,498	10,448	1,858	1,193	0,407

5.5.9 Caso de estudo 9 - Caixa com topo não-plano

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.22).

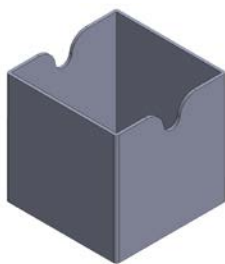


Figura 5.22 - Caixa com topo não-plano

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura máxima da parede: 0,2 polegadas

Diâmetro do furo lateral: 1 polegada

Raio do filete: 1/2 polegada

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 - Custos de fabrico de uma caixa com topo não-plano - Fundição injectada [USD]

Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	283.440	28,344	26,033	13,710	1,736	10,587	2,311
25000			516.275	20,651	19,614	13,710	1,670	4,235	1,036
50000			904.350	18,087	17,475	13,710	1,648	2,117	0,612
75000			1.292.400	17,232	16,762	13,710	1,640	1,412	0,470
100000			1.688.600	16,886	16,461	13,710	1,637	1,140	0,399

5.5.10 Caso de estudo 10 - Caixa com topo e fundo não-planos

Características gerais da peça e parâmetros considerados (ver Figura 5.23).

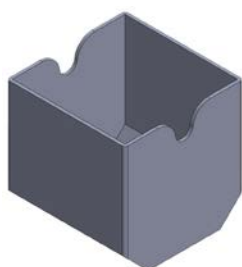


Figura 5.23 - Caixa com topo e fundo não-planos

Material: Alumínio A360;

Envelope x-y-z: 8x8x8 polegadas;

Espessura máxima da parede: 0,2 polegadas

Diâmetro do furo lateral: 1 polegada

Raio do filete: 1/2 polegada

Chamfros: 1,5 polegadas

Tolerância: Moderada ($\leq 0,01\mu\text{in}$)

Acabamento superficial: Qualidade mecânica

Quantidade a produzir: 10 000, 25 000, 50 000, 75 000 e 100 000 unidades.

Variando as quantidades, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 - Custos de fabrico de uma caixa com topo e fundo não-planos - Fundição injectada [USD]


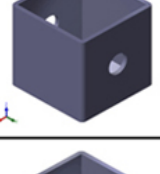
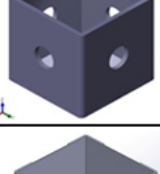
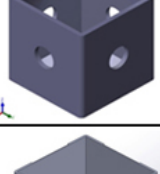
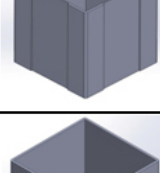
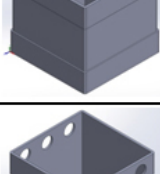
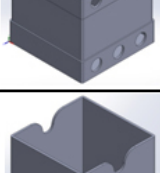
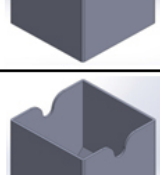


Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
10000	Moderada < 0,01 [μin]	Qualidade Mecânica	280.270	28,027	25,586	12,493	1,808	11,285	2,441
25000			495.925	19,837	18,749	12,493	1,742	4,514	1,088
50000			855.400	17,108	16,470	12,493	1,720	2,257	0,638
75000			1.214.850	16,198	15,711	12,493	1,713	1,505	0,487
100000			1.580.200	15,802	15,390	12,493	1,709	1,188	0,412

5.5.11 Casos de estudo - Síntese de resultados

Após a recolha dos valores obtidos, foi compilada a Tabela 5.24, onde se apresentam todos os custos envolvidos no fabrico das peças referentes aos dez casos de estudo acima descritos para melhor visualização.

Com base nestes dados, faz-se a discussão da influência das quantidades e da complexidade no custo unitário (ver 5.7).


Tabela 5.24 -Resumo dos resultados para os custos de fabrico das várias peças em análise [USD]

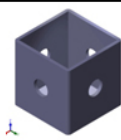
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	225.320	22,532	21,624	13,922	1,676	6,026	0,908
	25000			460.075	18,403	17,942	13,922	1,610	2,410	0,461
	50000			851.350	17,027	16,715	13,922	1,588	1,205	0,312
	75000			1.242.675	16,569	16,306	13,922	1,581	0,803	0,263
	100000			1.637.100	16,371	16,133	13,922	1,577	0,634	0,238
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	224.140	22,414	21,490	13,785	1,680	6,025	0,924
	25000			456.900	18,276	17,809	13,785	1,614	2,410	0,467
	50000			844.850	16,897	16,582	13,785	1,592	1,205	0,315
	75000			1.232.850	16,438	16,173	13,785	1,584	0,803	0,265
	100000			1.623.900	16,239	16,000	13,785	1,581	0,634	0,239
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	235.050	23,505	22,547	14,534	1,681	6,332	0,958
	25000			479.200	19,168	18,682	14,534	1,615	2,533	0,486
	50000			886.100	17,722	17,393	14,534	1,593	1,266	0,329
	75000			1.293.075	17,241	16,964	14,534	1,586	0,844	0,277
	100000			1.730.300	17,303	16,782	14,534	1,582	0,667	0,521
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	243.240	24,324	22,290	13,626	1,809	7,501	1,388
	25000			469.100	18,764	18,111	13,626	1,743	2,742	0,653
	50000			856.300	17,126	16,718	13,626	1,721	1,371	0,408
	75000			1.243.575	16,581	16,254	13,626	1,714	0,914	0,327
	100000			1.634.400	16,344	16,058	13,626	1,710	0,722	0,286
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	249.010	24,901	25,037	13,520	1,912	7,601	1,868
	25000			480.300	19,212	20,470	13,520	1,846	3,001	0,845
	50000			867.400	17,348	18,948	13,520	1,824	1,500	0,504
	75000			1.254.600	16,728	18,440	13,520	1,817	1,000	0,391
	100000			1.645.700	16,457	18,226	13,520	1,813	0,790	0,334
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	238.600	23,860	20,196	10,801	1,791	9,295	1,973
	25000			428.275	17,131	16,244	10,801	1,725	3,718	0,887
	50000			744.400	14,888	14,363	10,801	1,703	1,859	0,525
	75000			1.060.575	14,141	13,736	10,801	1,696	1,239	0,405
	100000			1.381.500	13,815	13,471	10,801	1,692	0,978	0,344
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	247.550	24,755	22,771	10,801	1,794	9,931	2,229
	25000			437.625	17,505	16,746	10,801	1,727	3,973	1,004
	50000			754.350	15,087	14,738	10,801	1,705	1,986	0,595
	75000			1.071.150	14,282	14,069	10,801	1,698	1,324	0,459
	100000			1.393.100	13,931	13,786	10,801	1,694	1,045	0,391
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	261.190	26,119	23,734	10,448	1,957	11,329	2,385
	25000			448.400	17,936	16,870	10,448	1,891	4,531	1,066
	50000			760.450	15,209	14,583	10,448	1,869	2,266	0,626
	75000			1.072.425	14,299	13,820	10,448	1,861	1,510	0,480
	100000			1.390.600	13,906	13,498	10,448	1,858	1,193	0,407
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	283.440	28,344	26,033	13,710	1,736	10,587	2,311
	25000			516.275	20,651	19,614	13,710	1,670	4,235	1,036
	50000			904.350	18,087	17,475	13,710	1,648	2,117	0,612
	75000			1.292.400	17,232	16,762	13,710	1,640	1,412	0,470
	100000			1.688.600	16,886	16,461	13,710	1,637	1,140	0,399
	Quantidade [unidades]	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada < 0,01 [µm]	Qualidade Mecânica	280.270	28,027	25,586	12,493	1,808	11,285	2,441
	25000			495.925	19,837	18,749	12,493	1,742	4,514	1,088
	50000			855.400	17,108	16,470	12,493	1,720	2,257	0,638
	75000			1.214.850	16,198	15,711	12,493	1,713	1,505	0,487
	100000			1.580.200	15,802	15,390	12,493	1,709	1,188	0,412

5.6 Influência do material no custo

Para poder avaliar a influência do material no custo final da peça, utilizou-se o caso de estudo 5 (caixa com quatro furos), apresentado em 5.5.5 para dois materiais, zinco e magnésio. Os respectivos custos provenientes da simulação efectuada estão apresentados na Tabela 5.25.

Tabela 5.25 - Tabela dos resultados obtidos para os custos de fabrico da peça para diferentes materiais

Zinco ZA-8; preço 1,2 \$/lb; peso específico 0,226 in/lb ³										
	Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada <	Qualidade	356.310	35,631	33,763	23,489	2,773	7,501	1,868
	100000	0,01 [µin]	Mecânica	2.722.300	27,223	26,889	23,489	2,650	0,750	0,334

Magnésio AM50A; preço 1,8 \$/lb; peso específico 0,0639 in/lb ³										
	Quantidade	Tolerância	Acabamento Superficial	Custo TOTAL	Custo PEÇA (Unitário)	Custo Injecção (Unitário)	Custo Material (Unitário)	Custo Produção (Unitário)	Custo de Ferramentas (Unitário)	Custo Acabamento (Unitário)
	10000	Moderada <	Qualidade	208.110	20,811	18,943	9,874	1,567	7,501	1,868
	100000	0,01 [µin]	Mecânica	1.242.700	12,427	12,093	9,874	1,468	0,750	0,334

A Figura 5.24 apresenta a distribuição de componentes de custo para os dois materiais e para duas quantidades, 10 000 e 100 000 unidades, a qual permite verificar que a escolha do material é de facto determinante no custo.

É de referir que a escolha do material constitui normalmente uma decisão de concepção. Apesar do zinco ter preço inferior ao magnésio, o custo da peça para este material é superior uma vez que o seu peso específico é 3,6 vezes superior.

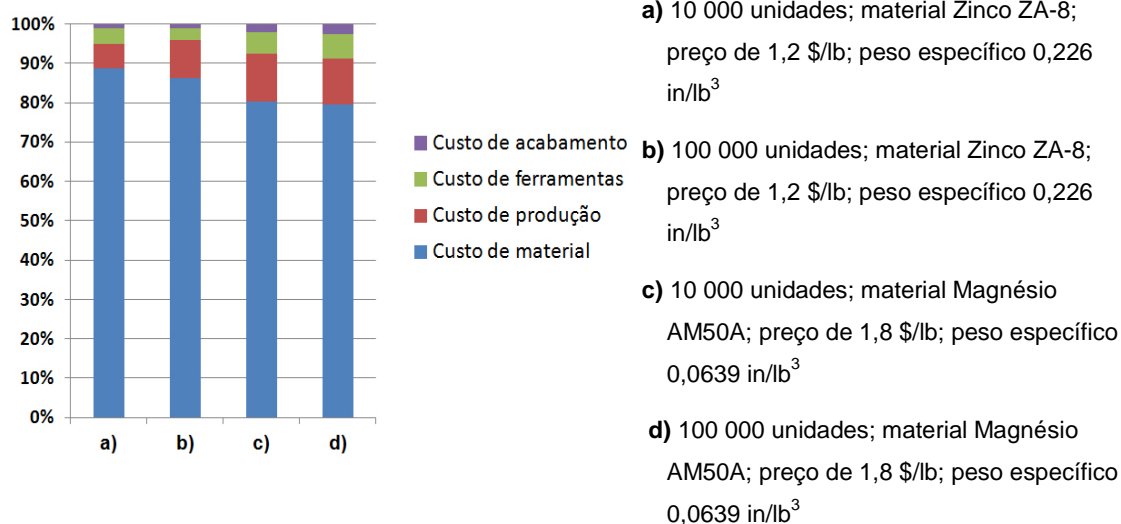


Figura 5.24 - Distribuição das componentes de custo da caixa com 4 furos para dois materiais (zinco e magnésio)

5.7 Discussão

5.7.1 Considerações relativas a decisões de carácter conceptual

Da síntese de resultados faz sentido começar por avaliar o custo por peça. A Figura 5.25 mostra os valores obtidos para todos os casos, sendo possível verificar o seguinte:

- Os custos diminuem com o aumento da quantidade a produzir sendo que a partir das 50 000 unidades a variação deixa de ser relevante;
- É notório que o custo varia com a complexidade notando-se que esta variação não se mantém constante com as quantidades.

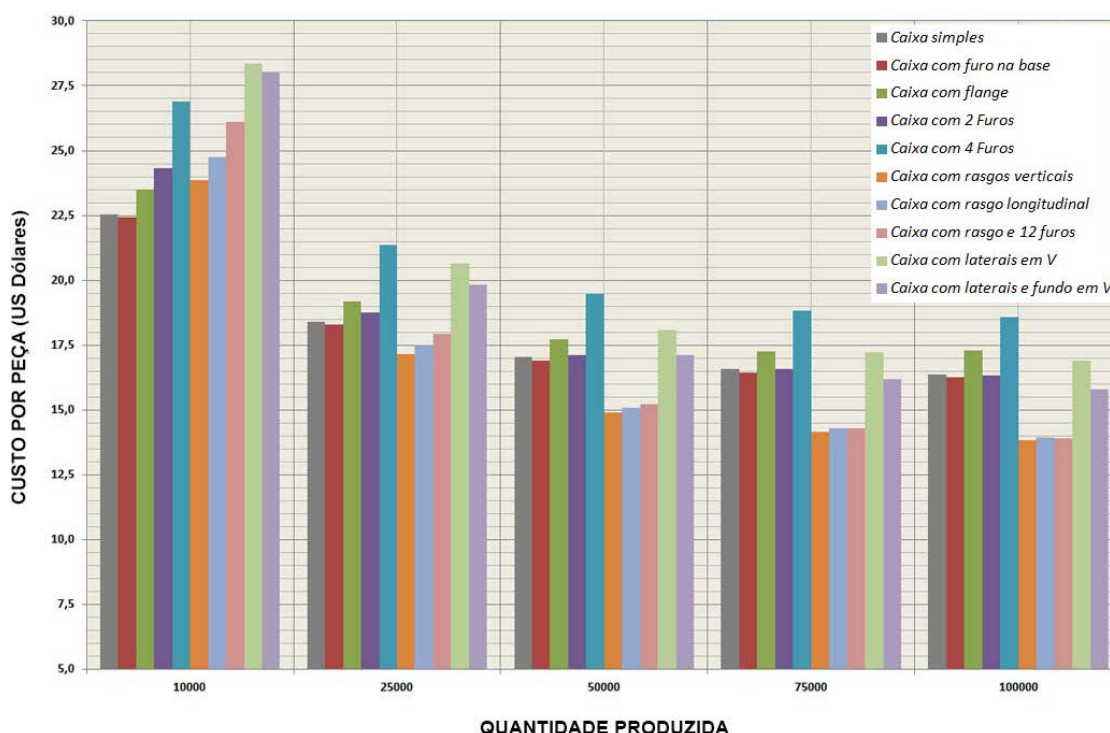


Figura 5.25 - Custo por peça para os diferentes casos de estudo e diferentes quantidades

Para analisar o peso das componentes do custo (ver estrutura de custo em 4.1) em função das quantidades, centra-se o estudo nas quantidades de 10 000 e 100 000 unidades (ver Figura 5.26 e Figura 5.27). Deste, é possível tirar algumas relações:

- Assumindo que a complexidade da peça é um factor relevante no custo das ferramentas, verifica-se que esta é determinante para pequenas quantidades;
- Para grandes quantidades, verifica-se que a componente custo de material assume uma relevância determinante.

Constata-se que tanto as quantidades como o material, enquanto decisões conceptuais são factores determinantes no custo. Podem considerar-se como sendo dois factores críticos do projecto e que vêm confirmar a tendência expressa no gráfico da Figura 2.2, de que as decisões conceptuais comprometem cerca de 60% do custo final de um produto.

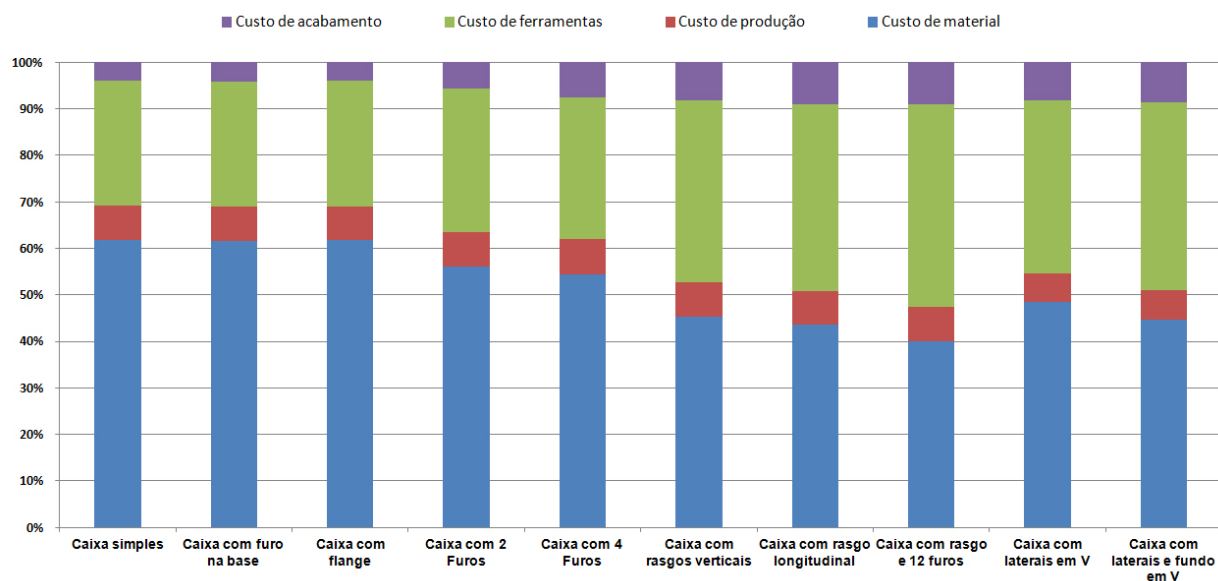


Figura 5.26 - Distribuição das componentes de custo para 10 000 unidades

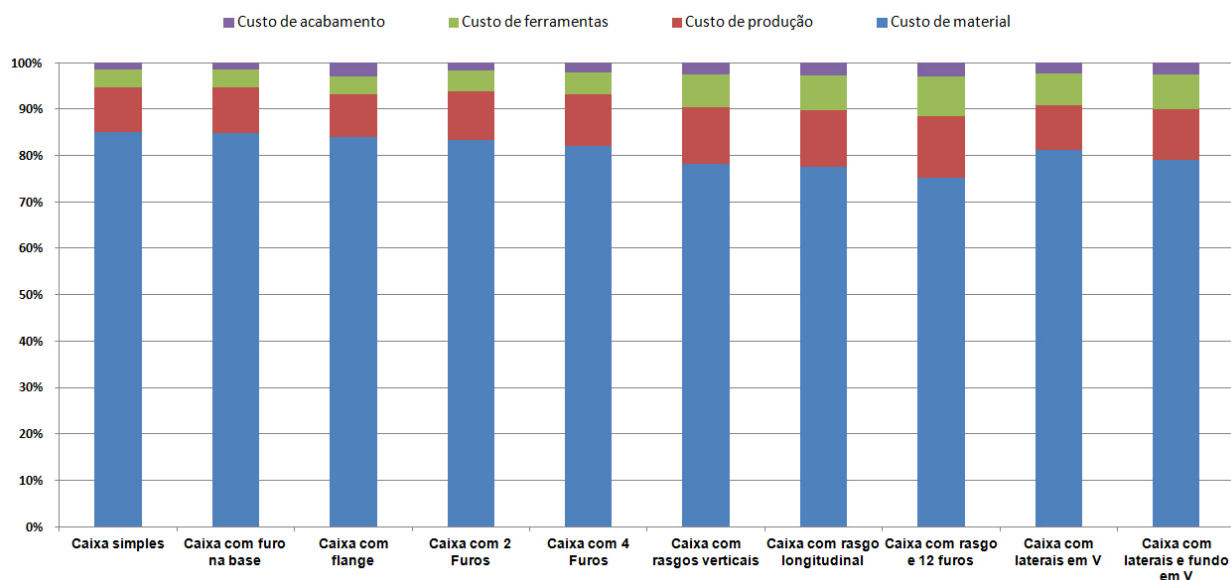


Figura 5.27 - Distribuição das componentes de custo para 100 000 unidades

5.7.2 Considerações relativas a decisões no projecto de pormenor

Caixa simples VS Caixa com furo na base:

- Verifica-se que a caixa simples tem um custo mais elevado que a caixa com furo na base independentemente da quantidade a produzir (22,53 dólares contra 22,41 dólares). Verifica-se que o mesmo se passa em termos de custos de injeção, sendo a caixa simples mais cara que a com furo na base;
- Em termos do custo de produção, a peça com furo apresenta um custo superior para qualquer quantidade produzida, justificável pela necessidade de um molde mais complexo;
- O custo de ferramentas é praticamente igual a partir das 25 000 unidades produzidas;

- iv. Em termos globais, apesar de uma caixa com furo necessitar de um molde mais complexo (o que implica um custo de produção mais elevado), esse furo representa um decréscimo na quantidade de material necessária (com custo de 13,92 dólares contra 13,79 dólares). O custo do material tem mais expressão no custo final que o custo necessário para realizar o acabamento da peça., justificando assim o preço superior da caixa simples;
- v. A quantidade a produzir é de enorme importância, principalmente quando se tratam de quantidades pequenas, isto é, entre 10 000 e as 50 000 já que para estas quantidades, as variações são grandes e não são directamente proporcionais à quantidade;
- vi. Os custos atenuam-se com o aumento da produção.

Caixa simples VS Caixa com aba:

- i. Verifica-se que a caixa com aba lateral tem um custo mais elevado que a caixa simples independentemente da quantidade a produzir. (23,51 dólares contra 22,53 dólares);
- ii. Em termos de custo de produção a peça com aba lateral apresenta um custo superior para qualquer quantidade produzida, justificável pela necessidade de um molde mais complexo;
- iii. O custo de material é superior para a caixa com aba lateral dado que esta possui maior volume que a caixa simples;
- iv. O acréscimo de uma característica geométrica como uma aba lateral obriga a um molde mais complexo. A diferença de custo entre uma peça e outra, é justificada por a um custo de produção mais elevado, e principalmente a uma maior quantidade de material necessária (dado o seu volume ser maior que o volume da caixa simples), e ao aumento de custo de acabamento;
- v. Os custos atenuam-se com o aumento da produção.

Caixa com 2 furos VS Caixa com 4 furos:

- i. Para produzir uma caixa com dois furos, são necessários para uma produção de 10 000 unidades, 24,32 dólares e 26,91 dólares para produzir uma caixa com quatro furos. Esta diferença prende-se principalmente pela necessidade de um molde que implica movimento em duas direcções face ao molde da caixa com dois furos que implica movimento apenas numa direcção;
- ii. Para pequenas quantidades estas diferenças são mais expressivas, atenuando-se com o aumento das quantidades a produzir;
- iii. O custo de material é inferior para a caixa com quatro furos dado que tem maior volume. O custo de produção é superior para a caixa com quatro furos tal como o custo de injeção;
- iv. O custo de ferramentas é superior para a caixa com quatro furos. O custo do acabamento de quatro furos é maior do que para dois furos;

Caixa com rasgos verticais VS Caixa com rasgos longitudinais:

- i. Apesar do mesmo volume, a caixa com rasgos longitudinais tem um custo mais elevado (24.76 contra 23,86 dólares). Esta diferença deve-se à diferença do fecho do molde (é mais difícil do ponto de vista técnico o fecho do molde para o caso dos rasgos longitudinais) .ao custo de produção, ao custo de ferramentas e ao custo de acabamento que é superior para qualquer quantidade produzida.

Caixa com rasgos longitudinais VS :Caixa com rasgos longitudinais e 12 furos:

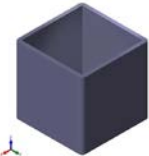
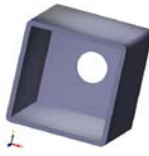
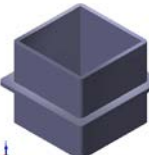

- i. A peça com rasgos e furos é mais cara. Este encarecimento é devido à necessidade do molde ter de contemplar os furos e possuir movimento numa direcção;
- ii. O acréscimo na complexidade do molde tem como consequência o aumento do custo de produção, de ferramentas e de acabamento;
- iii. O custo de material é menor para a caixa com rasgos longitudinais uma vez que esta tem volume inferior;
- iv. Para grandes quantidades a produzir, o custo da matéria prima necessária é uma das variáveis que causa maior variação no custo final da peça.

Caixa com topo não plano VS :Caixa com topo e fundo não planos:

- i. Estas duas peças são as que apresentam a maior complexidade do conjunto analisado.
- ii. Tratam-se de duas peças cujo fecho do molde não é plano, isto é, necessitam de um molde complexo para permitir realizar o fecho com as características geométricas definidas o que torna mais cara a sua realização.
- iii. No que respeita ao custo por peça, a peça com o topo não-plano é mais cara que a que possui o topo e o fundo não-planos.
- iv. Apesar da maior complexidade geométrica da peça com topo e fundo não-planos, o custo adicional da segunda em termos de custo de produção, ferramentas e acabamento, é compensado pela necessidade de utilizar uma maior quantidade de matéria-prima no fabrico da primeira.

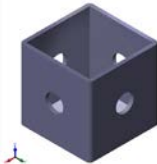
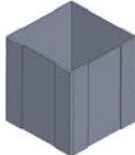

A Tabela 5.26 apresenta uma síntese das considerações relativas ao projecto de pormenor.

Tabela 5.26 - Síntese das considerações relativas ao projecto de pormenor

CASO DE ESTUDO	ALTERAÇÃO	VS	IMPLICAÇÕES	CONCLUSÕES
<p>Caso 1</p> 	Peça de referência para o estudo efectuado			
<p>Caso 2</p> 	Furo na direcção de fecho do molde	Caso 1	Não há variações significativas em termos de custo (entre -0,5 e -0,8%). Esta variação deve-se à utilização de menos material. O custo de ferramentas não tem variações significativas	C ₁) Pequenos pormenores geométricos na direcção de fecho do molde não implicam variações significativas, a menos das derivadas da quantidade de material necessária à realização da peça.
<p>Caso 3</p> 	Aba lateral perpendicular à direcção de fecho do molde	Caso 1	Pequena variação em termos de custo (entre 4,3 e 5,7%). Esta variação deve-se à utilização de mais material. O custo de ferramentas não tem variações significativas.	
<p>Caso 4</p> 	2 furos perpendiculares à direcção de fecho do molde	Caso 1	Pequena variação em termos de custo (entre 8% e -0,2%). Esta variação deve-se ao custo de ferramentas, relevante para pequenas quantidades e atenuado para grandes quantidades.	C ₂) Pormenores geométricos que implicam movimentos noutras direcções que não a do fecho do molde, têm implicações no custo, em particular para produções de pequenas quantidades.
		Caso 3	Embora o pormenor mantenha a direcção do pormenor do caso 3, este implica movimento perpendicular ao fecho do molde, daí o custo do molde ser superior. Para grandes quantidades a produzir, o custo diminui devido a necessitar de menos material.	

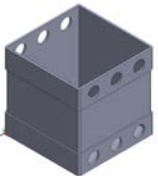


(Continua)

Tabela 5.26 (Continuação) - Síntese das considerações relativas ao projecto de pormenor

CASO DE ESTUDO	ALTERAÇÃO	VS	IMPLICAÇÕES	CONCLUSÕES
<p>Caso 5</p> 	4 furos perpendiculares à direcção de fecho de molde	Caso 1	Variação em termos de custo (entre 10,5% e 0,5%). Esta variação deve-se ao custo de ferramentas e ao custo de acabamento, relevante para pequenas quantidades e atenuado para grandes quantidades.	C ₃) O acréscimo de pormenores que impliquem diferentes direcções de movimento no molde, reflecte-se muito significativamente no custo no custo. Este efeito atenua-se para grandes quantidades.
		Caso 4	Pequena variação em termos de custo (entre 2,4% e 0,7%). Esta variação deve-se ao custo de ferramentas necessárias para a realização do molde (furos em 2 direcções perpendiculares ao fecho do molde) e ao custo de acabamento, relevante para pequenas quantidades e atenuada para grandes quantidades. Para grandes quantidades a produzir, o custo diminui devido a necessitar de menos material.	
<p>Caso 6</p> 	Rasgos na direcção de fecho do molde	Caso 1	Grande variação em termos de custo (entre 5,9% e -15,6%). Esta variação deve-se ao custo de ferramentas necessárias para a realização do molde e ao custo de acabamento. Este custo é mais elevado para pequenas quantidades. Para grandes quantidades a produzir, é evidente a diminuição do custo devido a necessitar de menos material.	C ₁
<p>Caso 7</p> 	Rasgos perpendiculares à direcção de fecho do molde	Caso 1	Variação em termos de custo (entre 9,9% e -14,9%). Esta variação é devida ao custo das ferramentas e ao custo de acabamento necessário à realização da peça. Para grandes quantidades a produzir, o custo diminui devido à peça necessitar de menos material.	
		Caso 6	Custo de material invariável dado que a quantidade de material necessária é a mesma. Para pequenas quantidades há uma variação de custo não negligenciável atenuando-se drasticamente para grandes quantidades (entre 3,8% e 0,8%). A variação de custo de ferramentas e acabamento deve-se ao facto de serem necessários rasgos em direcção perpendicular ao fecho molde.	C ₁ , C ₂ e C ₃

(Continua)

Tabela 5.26 (Continuação) - Síntese das considerações relativas ao projecto de pormenor

CASO DE ESTUDO	ALTERAÇÃO	VS	IMPLICAÇÕES	CONCLUSÕES
<p>Caso 8</p> 	<p>Rasgos e 12 furos perpendiculares à direcção de fecho do molde</p>	Caso 1	<p>Grande variação em termos de custo (entre 15,9% e -15,1%).</p> <p>Esta variação é devida ao custo das ferramentas (praticamente o dobro para pequenas quantidades) e ao custo de acabamento necessário à realização da peça.</p> <p>Para grandes quantidades, devido à menor utilização de material, o custo das ferramentas e de acabamento dilui-se e o custo final é menor</p>	<p>C₄) A complexidade da peça (em termos das implicações na complexidade do molde) tem grande influência negativa no custo para produções de pequenas quantidades;</p> <p>C₅) A quantidade de material tem grande influência negativa no custo para produções de grandes quantidades;</p>
		Caso 7	<p>Pequena variação em termos de custo (entre 4,2% e -2,1%).</p> <p>Esta variação é devida ao custo das ferramentas (são necessários rasgos e furos em direcção perpendicular ao fecho molde) e ao custo de acabamento necessário à realização da peça.</p> <p>Para grandes quantidades, devido à menor utilização de material, o custo das ferramentas e de acabamento dilui-se e o custo final é menor</p>	
<p>Caso 9</p> 	<p>Topo não-plano</p>	Caso 1	<p>Grande variação em termos de custo (entre 25,8% e 3,1%). Para pequenas e médias quantidades o custo de ferramentas é cerca do dobro e o de acabamento é praticamente o triplo.</p> <p>A necessidade de um molde complexo para permitir realizar o fecho com as características geométricas definidas torna mais cara a sua realização.</p>	<p>C₄) A complexidade da peça (em termos das implicações na complexidade do molde) tem grande influência negativa no custo para produções de pequenas quantidades;</p> <p>C₅) A quantidade de material tem grande influência negativa no custo para produções de grandes quantidades;</p>
<p>Caso 10</p> 	<p>Topo e fundo não-planos</p>	Caso 1	<p>Grande variação em termos de custo (entre 24,4% e -3,5%). Para pequenas e médias quantidades o custo de ferramentas é cerca do dobro e o de acabamento praticamente o triplo.</p> <p>Para grandes quantidades, o facto de necessitar de menos material, faz com que a peça seja mais barata em termos de custo final.</p>	
		Caso 9	<p>Apesar da maior complexidade geométrica da peça, o custo adicional em termos de custo de produção, ferramentas e acabamento, é compensado pela necessidade de utilizar uma maior quantidade de matéria-prima no fabrico da primeira.</p>	

6 CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

Quanto às conclusões, estas apresentam-se em três categorias: a) relativas à análise dos casos; b) relativas à utilização do software de estimação de custos; e c) relativas à metodologia proposta.

a) Conclusões relativas à análise dos casos:

- ✓ É determinante ter em conta que a complexidade geométrica da peça é a variável mais importante para produções de pequena quantidade.
- ✓ Para grandes produções passa a ser determinante o volume de matéria prima, cujo efeito é acentuado com o seu custo específico.
- ✓ Para grandes produções (caso não seja possível negociar o preço do material com os fornecedores), deve dar-se especial importância à optimização da utilização do material, seja pela introdução de novas características geométricas que permitam minimizar a quantidade de material necessária ou com alteração de outras, que tornem o volume e consequente peso, inferiores, desde que em momento algum sejam comprometidos os seus requisitos funcionais e resistência estrutural, idealmente pela utilização de peças de igual resistência.
- ✓ Hierarquicamente, para pequenas quantidades, pode afirmar-se que os custos envolvidos no processo de produção são, em primeiro lugar, influenciados pelo custo de ferramentas, pelo custo de acabamento da peça - dependentes da complexidade da peça - e por fim pelo custo de produção. Assim, a complexidade da peça é o factor crítico de decisão em fase de projecto para pequenas quantidades a produzir.
- ✓ Para grandes quantidades, os custos são influenciados em primeiro lugar pelo custo de material, seguido pelo custo de produção, pelo custo de ferramentas e finalmente pelo custo de acabamento. Nesta situação, o projecto deverá investir na optimização das formas com vista à minimização da matéria prima utilizada.

b) Conclusões relativas à utilização do software de estimação de custos:

- ✓ O *software* tem características de utilização empresarial. Por mês são realizadas em média 15 000 estimativas através deste software.
- ✓ O sítio onde pode ser encontrado (www.custompart.net), tem parcerias com fabricantes, empresas, fornecedores de material, e permite o acesso a artigos científicos diariamente actualizados, a uma biblioteca de materiais, de processos e de peças, constituindo uma importante ferramenta auxiliar a um projecto.

- ✓ Utiliza dados reais que permitem efectuar comparações entre propostas de solução alternativas.
- ✓ Apresenta uma vantagem relevante pelo facto de ser completamente gratuita quer para alunos, quer para professores, engenheiros ou qualquer outro utilizador, bastando para isso efectuar o registo.
- ✓ Depois do registo é possível guardar as estimativas realizadas para que mais tarde possam ser consultadas e/ou modificadas, de modo a permitir a possibilidade de efectuar comparações semelhantes às aqui analisadas e documentadas.
- ✓ Este software abrange a generalidade das tecnologias de fabrico usadas.
- ✓ Para cada uma das tecnologias, o conjunto de variáveis de parametrização a elas associadas conduz a uma boa precisão da estimação de custo.
- ✓ Está em constante evolução, há *feedback* das empresas associadas e garantindo assim a constante evolução e acompanhamento ao do que mais moderno existe em termos dos processos tecnológicos.
- ✓ Para além da apresentação do custo sob a forma total, apresenta o custo discriminado nas suas componentes.
- ✓ Embora o menu do programa apresente um número alargado de tecnologias, na realidade, este só permitiu fazer estimação de custo em maquinaria e em fundição.
- ✓ No âmbito do trabalho desenvolvido, esta ferramenta mostrou-se prática, fiável, e foi de grande auxílio sob ponto de vista da simplicidade de funcionamento, da informação disponibilizada e pela capacidade de quantificar os custos inerentes ao projecto de um peça, permitindo assim ultrapassar a dificuldade na interiorização do impacto das tomadas de decisão.

c) Conclusões relativas à metodologia proposta para ensino de projecto para fabrico em engenharia mecânica com base na estimativa de custo:

- ✓ É possível fazer a interpretação do custo em termos das suas parcelas e assim relacioná-las com as características do projecto.
- ✓ A presente dissertação abordou a fundição injectada, tendo permitido chegar a conclusões quanto uma metodologia a utilizar com recurso a este *software* no sentido da sequência das decisões a tomar, constituindo um exemplo a utilizar para outros casos.
- ✓ Esta proposta de metodologia, com as suas quatro fases, "Fase A - Selecção de tecnologias alternativas"; "Fase B - Avaliação do peso dos parâmetros no custo unitário"; "Fase C - Comparação entre tecnologias" e "Fase D - Avaliação do custo unitário em função da complexidade geométrica", mostrou-se prática, coerente e a lógica da realização da sequência das fases mostrou-se indicada, permitindo concluir

que esta metodologia é de grande utilidade e cumpre o objectivo a que se propôs: a de ser um auxiliar no ensino e sensibilização de engenheiros em formação para a realidade da indústria, dos custos envolvidos e para salientar a importância da tomada de decisão na fase conceptual e de projecto de pormenores onde estas decisões têm maior influência nos custos de fabrico de determinada peça.

- ✓ Sob o ponto de vista didáctico mostra-se interessante a sua aplicação no âmbito de uma disciplina de projecto na fase final da formação em engenharia mecânica. Deste modo, permitiria aos alunos experimentar variações de quantidades, tolerâncias, capacidade de fabrico e geometrias, de modo a ter uma noção prática do que é a realidade dos custos associados ao desenvolvimento do projecto, concepção e produção de um produto, desenvolvendo assim capacidade para uma tomada de decisão fundamentada.

O trabalho realizado não teve a pretensão de uma exploração exaustiva das capacidades do *software* utilizado. Assim, quanto ao trabalho futuro, são pertinentes as sugestões seguintes:

- Estender a metodologia a outros processos tecnológicos, maquinaria e injeção plástica por exemplo, com o intuito de realizar o estudo comparativo de outras peças noutras tecnologias de modo a poder constituir mais um objecto de estudo.
- Realizar a parametrização dos custos horários (de mão-de-obra, máquinas, etc.), de energia e de matéria prima para a realidade portuguesa.
- Alargar a experiência realizada a produtos com complexidades muito variadas e que constituam componentes de um sistema mecânico, eventualmente combinando com uma abordagem de projecto para montagem (*Design for Assembly*).

7 REFERÊNCIAS

- Adnan Niazi e Jian S.Dai ,(2006), "*Product cost estimation: Technique classification and methodology review*", University of London, Journal of Manufacturing Science and engineering, ASME volume 128, 563-575.
- A. Mourão, 1991, "*Projecto para fabrico e montagem - princípios gerais*". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- A. Mourão, (1999), "*Desenvolvimento integrado de produtos - Engenharia Simultânea e Projecto para Fabrico e Montagem*", Brochura didáctica, FCT UNL.
- A. Mourão, V. A. Cruz Machado, (1996), "*Simultaneous Engineering: an Implementation Model*", in Raj Gill and Chanan S. Syan (Ed.), CAD/CAM Robotics and Factories of the Future (ISBN 1 898253 03 X), pp. 347-352, Middlesex University, London, England.
- C. Poli, (2001), "*Design for Manufacturing: A Structured Approach*", Butterworth-Heinemann.
- D. M. Anderson, (2004) "*Design for Manufacturability & Concurrent Engineering; How to Design for Low Cost, Design in High Quality, Design for Lean Manufacture, and Design Quickly for Fast Production*", CIM Press, (cap 1.13).
- E. C Morley, (1998), "*Teaching cost awareness in design for manufacture*", IDATER, Loughborough University, (cap. 3.3).
- F. H'mida, P. Martin, F. Vernada, (2006), "*Cost estimation in mechanical production: The Cost Entity approach applied to integrated product engineering*", Int. J. Production Economics 103, 17–35.
- G.Boothroyd, P.Dewhurst, e W.Knight, (2004), "*Product design for manufacture and assembly*", New York, NY: Marcel Dekker, Inc.
- H. Vliet e K Luttervelt, (2004) "*Development and application of a mixed product/process-based DFM methodology*", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 17:3, 224-234.
- H.E.Trucks (1987), "*Designing for economical production*", 2nd Edition, Society of manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan.
- <http://www.custompart.net>, (online), acedido desde 12 Abril 2013 .
- <http://www.dfma.com>, (online), acedido a 13 Junho 2013).
- <http://www.diecasting.org> (online), acedido a 20 Julho 2013.
- <http://www.mtisystems.com>, (online), acedido em 8 Junho 2013.

- J. A Barton, D. M. Love, G. D. Taylor, (2001): "*Design determines 70% of cost? A review of implications for design evaluation*" Journal of Engineering Design, Vol 12 nº1, 47-58.
- J. Bralla, (1986), "*Handbook of product design for manufacturing : a guide to low cost production*", McGraw-Hill.
- K. Ulrich e S. Eppinger, (2000), "*Product design and development*", Boston, MA, McGraw-Hill.
- L. Reifschneider (2000), "*Teaching Design for Manufacturability with Desktop Computer-Aided Analysis*", Journal of Industrial Technology, Volume 16, Number 3, May 2000 to July 2000.
- Paul Degarmo,; J T. Black, Ronald A. Kohser, (2003), "*Materials and Processes in Manufacturing*", (9th ed.), Wiley, 227.
- R. Bogue, (2012), "*Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications*", Assembly Automation, 32/2 (2012) 112–118.
- R. G. Chougule e B.Ravi, (2005), "*Casting Cost Estimation in an Integrated Product and Process Design Environment*", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 19(7), 676-688.
- T. Kuo, S. Huang e H.Zhang, (2001), "*Design for manufacture and design for "X": Concepts, applications and perspectives*", Computers & Industrial Engineering 41 241-260.
- T.Tomiyama, P.Gu, Y.Jin, D.Lutters, Ch.Kind, F.Kimura, (2009), "*Design methodologies: Industrial and educational applications*" ,CIRP Annals - Manufacturing Technology 58, 543–565.